

PUBLICATION NUMBER : 2000171650  
PUBLICATION DATE : 23-06-00

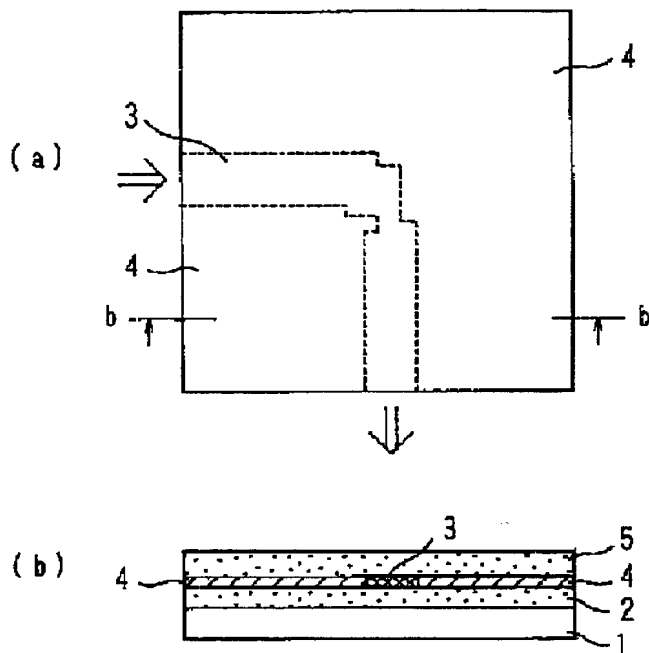
APPLICATION DATE : 04-12-98  
APPLICATION NUMBER : 10345701

APPLICANT : COMMUNICATION RESEARCH  
LABORATORY MPT;

INVENTOR : IZUTSU MASAYUKI;

INT.CL. : G02B 6/122

TITLE : OPTICAL WAVEGUIDE AND ITS  
PRODUCTION AND OPTICAL DEVICE  
USING THIS OPTICAL WAVEGUIDE



ABSTRACT : PROBLEM TO BE SOLVED: To provide constitution capable of embodying bent optical waveguides of low loss and small radius of curvature and branch optical waveguides of low loss and large in branching angles and a process for producing the same and to provide small-sized optical devices using these optical waveguides.

SOLUTION: A lower clad layer 2 is deposited on a substrate 1 by an ozone oxidation type CVD method and a core layer 3 is formed on this lower clad layer 2. The core layer flank constituting the bent part of the optical waveguide is provided with a metal clad layer 4. An upper clad layer 5 is deposited on the core layer 3 and the metal clad layer 4 at  $\leq 600^{\circ}\text{C}$  by the ozone oxidation type CVD method.

COPYRIGHT: (C)2000,JPO



(51) Int.Cl.<sup>7</sup>

識別記号

F I

テマコード\* (参考)

G 0 2 B 6/122

G 0 2 B 6/12

A 2 H 0 4 7

審査請求 未請求 請求項の数 9 O L (全 24 頁)

(21) 出願番号

特願平10-345701

(22) 出願日

平成10年12月4日 (1998.12.4)

(71) 出願人 000006013

三菱電機株式会社

東京都千代田区丸の内二丁目2番3号

(71) 出願人 391027413

郵政省通信総合研究所長

東京都小金井市貫井北町4丁目2番1号

(72) 発明者 高林 正和

東京都千代田区丸の内二丁目2番3号 三

菱電機株式会社内

(74) 代理人 100102439

弁理士 宮田 金雄 (外2名)

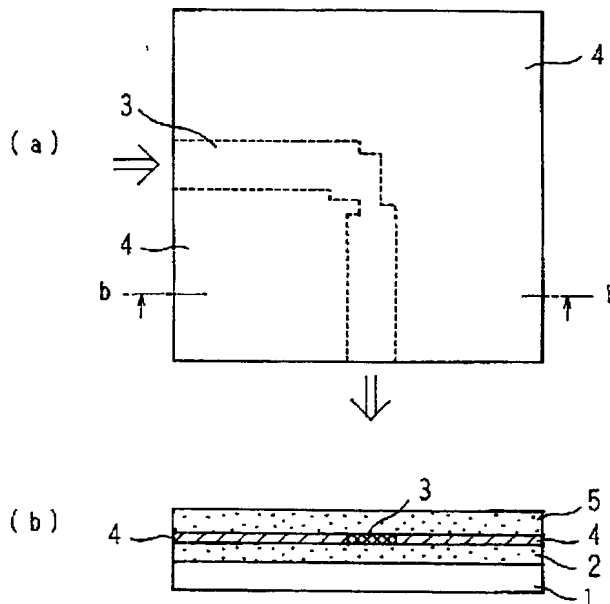
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 光導波路とその製造方法、およびこの光導波路を用いた光デバイス

(57) 【要約】

【課題】 低損失で曲率半径が小さい曲がり光導波路や、低損失で分岐角の大きい分岐光導波路を実現できる構成およびその製造方法を提供する。また、これらの光導波路を用いた小型の光デバイスを提供する。

【解決手段】 オゾン酸化型CVD法により、基板1上に下クラッド層2を成膜し、この下クラッド層2上にコア層3と、光導波路の曲がり部を構成するコア層側面に金属クラッド層4を設け、これらコア層3と金属クラッド層4上に、上クラッド層5を上記オゾン酸化型CVD法により600℃以下で成膜するようにした。



1 : 基板                      4 : 金属クラッド層  
2 : 下クラッド層          5 : 上クラッド層  
3 : コア層

## 【特許請求の範囲】

【請求項1】 コア層とクラッド層により構成された光導波路において、上記光導波路の曲がり部または分岐部のコア層の側面に金属クラッド層を設けるとともに、上記金属クラッド層以外の導波路材料を石英系材料で構成し、上記曲がり部または分岐部に、波動インピーダンスマッチング回路と、モードを保存させるモードフィルタとの少なくともいずれか一方を設けたことを特徴とする光導波路。

【請求項2】 コア層とクラッド層、またはコア層とクラッド層と金属クラッド層により構成された光導波路において、上記光導波路の曲がり部または分岐部におけるコア層の屈折率を、曲げられる方向となる曲率中心側の屈折率が、曲率中心外側の屈折率に比べて大きくなるようにしたことを特徴とする光導波路。

【請求項3】 請求項2記載の光導波路において、上記光導波路の曲がり部または分岐部におけるコア層に、少なくとも1個以上の三角形状の高屈折率領域を設けて屈折率に分布を持たせたことを特徴とする光導波路。

【請求項4】 コア層とクラッド層、またはコア層とクラッド層と金属クラッド層により構成された光導波路において、上記光導波路の曲がり部または分岐部におけるコア層に、曲げられる方向に沿ってガウス分布状の屈折率分布をもたせるとともに、上記屈折率分布のピーク位置がコア幅の中心よりも、曲げられる方向となる曲率中心側に位置するようにしたことを特徴とする光導波路。

【請求項5】 コア層とクラッド層、またはコア層とクラッド層と金属クラッド層により構成された光導波路と、上記光導波路とは軸の異なるコア層を有する光導波路とが接合された光導波路において、接合部のコア層側面に金属クラッド層を設けるとともに、上記接合部を、階段式テーパー形状をしたコア構造としたことを特徴とする光導波路。

【請求項6】 コア層とクラッド層により構成された光導波路の曲がり部または分岐部のコア層側面に金属クラッド層を設けるとともに、上記金属クラッド層以外の導波路材料を石英系材料で構成した光導波路の製造方法において、上記コア層の側面に上記金属クラッド層を設けた後に、上記コア層および上記金属クラッド層を囲むクラッド層を600℃以下で成膜したことを特徴とする光導波路の製造方法。

【請求項7】 コア層とクラッド層により構成された光導波路の曲がり部または分岐部のコア層側面に金属クラッド層を設けるとともに、上記金属クラッド層以外の導波路材料を石英系材料で構成した光導波路の製造方法において、上記金属クラッド層は、上記光導波路の曲がり部または分岐部に、コアの側面に沿った溝を形成し、上記溝に金属を充填して製造したことを特徴とする光導波路の製造方法。

【請求項8】 コア層とクラッド層、またはコア層とク

ラッド層と金属クラッド層により構成された光導波路において、上記光導波路の曲がり部または分岐部におけるコア層に紫外光を照射し、上記コア層の屈折率に分布を持たせたことを特徴とする光導波路の製造方法。

【請求項9】 請求項1ないし5のいずれかに記載の光導波路を使用したことを特徴とする光デバイス。

## 【発明の詳細な説明】

## 【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、光通信分野及び光コンピュータにおいて重要な部品である曲がり光導波路または分岐光導波路を有する光導波路、およびその製造方法、並びにこの光導波路を使用した光素子や光集積回路を含む光デバイスに関するものである。

## 【0002】

【従来の技術】光集積回路は、発光・受光素子、光スイッチ、光分岐結合器などの光素子を同一基板上に形成し、それらを接続したものより成り、単独の光素子では得られない機能を安定かつ低電圧動作することができる光デバイスである。また、さらなる低消費電力化、小型軽量化を進めるためには、より一層の集積化が必要となる。より多くの光素子を集積化する上での制約要因として、

(1) 光強度を変調するのに必要な電圧などが素子長に反比例する。

(2) 近接した素子間で電氣的、あるいは光学的干渉が生ずる。などが挙げられるが、

(3) 各素子を結合するための曲がり光導波路を急激に曲げることができない。(通常曲率半径Rは数mm～数十mm：図30(a)参照)

(4) 導波路を伝搬する光導波モードを分岐させる時に、分岐角 $\theta$ を大きくできない。(通常Y分岐光導波路の分岐角 $\theta$ は数度以内：図30(b)参照)

という問題を解決することも高密度集積には不可欠である。

【0003】素子間を曲線状の曲がり光導波路を用いて接続する場合の光導波モードの受ける損失は、クラッドとコアの屈折率差 $\Delta n$ と曲率に依存する。 $\Delta n$ が大きいほど、また曲率が大きいほど損失は小さくなる。 $\text{LiNbO}_3$ 基板にTiを拡散した曲線状曲がり光導波路では曲率半径30～40mm程度では0.5dB/cm以下の値が得られているが、曲率半径を小さくすると、損失は大きくなる。(M. Kondo, et al: IEEE J. Quantum Electron., QE-18(1982), 1759)一方、図31のように光導波モードをミラーで全反射させて光路を垂直に折り曲げる方法も考案されているが、損失は4dB程度と大きい。(女鹿田, 他: 昭和60年電子通信学会総合全国大会, 966.)

実際の光デバイスには損失の影響を考え、曲率半径数mm～数十mmの曲線状曲がり光導波路や分岐角度度以内

のY分岐光導波路が用いられているが、例えば曲線状曲がり光導波路を用いた光フィルタは20mm程度の長さのものになってしまう。

【0004】最近、FD-TD法を用いた電磁界計算により、金属クラッド層を有するL曲がり光導波路及びT分岐光導波路において、波動インピーダンスマッチング回路及びモードフィルタを組み合わせることにより、低損失でかつ垂直に光導波モードの伝搬方向を変えることができることが確認された。図32にこのようなL曲がり光導波路(図32(a))、及びT分岐光導波路(図32(b))の一例を示す。図において、3はコアであり、 $\lambda$ は光の波長、Dで示される部分は波動インピーダンスマッチング回路、Eで示される部分はモードフィルタである。図32に示される光導波路では、クラッドとコアの屈折率差 $\Delta n$ を大きくすることを目的としてクラッドに金属を用いている。さらに、L曲がり部の導波路幅、及びT分岐部の導波路幅を、図32のDの部分のように変化させて波動インピーダンスを整合することで低損失なL曲がり光導波路及びT分岐光導波路を実現している。波動インピーダンス整合がとれていないと、L曲がり部及びT分岐部に光を入射したときの反射光が大きくなる。また、L曲がり部及びT分岐部の出射側のくびれた部分は、高次モードを抑圧するためのフィルタ特性を有している。コアが数 $\mu$ m幅で、石英系材料のみからなる光導波路では、単一モードしか存在しないのに対し、金属クラッド導波路では多モード構造となり、通常曲がり部及び分岐部ではモード変換され、損失が大きくなる。モードフィルタを組み合わせることにより単一モードのみを出射側へ伝搬させ、低損失なL曲がり光導波路及びT分岐光導波路を形成できる。しかしこのようなL曲がり光導波路およびT分岐光導波路は作製が難しい。すなわち、比較的融点の低い金属クラッドをコアの側面に設けなければならないので、その上に上クラッド層を成膜する際に金属クラッドが損傷を受け易く、よってこのようなL曲がり光導波路およびT分岐光導波路を作製する際には、金属クラッド層が損傷を受けないような材料や成膜法を適用する必要がある。

【0005】

【発明が解決しようとする課題】従来の曲がり光導波路及び分岐光導波路は以上のようにして構成されており、通常の曲線状の曲がり光導波路では、導波路の曲率半径を小さくすれば放射損失が大きくなるし、導波路ミラーを用いて光路を垂直に折り曲げる方法も光導波モードの受ける損失は大きくなる。従って、実際の光デバイスには曲率半径数mm～数十mmの曲線状の曲がり光導波路や分岐角度度以内のY分岐光導波路が用いられており、このことが集積度の増加を妨ぐ一大要因となっていた。しかしさらなる集積化を実現するためには、損失が小さくかつ曲率半径の小さい曲がり光導波路、及び損失が小さくかつ分岐角の大きい分岐光導波路が必要になる。

【0006】本発明は、上記のような要求を満たすために、前述した、波動インピーダンスマッチング回路とモードフィルタを組み合わせ、さらに金属クラッド層を有するL曲がり光導波路及びT分岐光導波路に対し、その材料及び製造方法を最適化し、低損失で垂直に曲がる、あるいは低損失で垂直に分岐する光導波路を実現するものである。また、通常の曲線状の曲がり光導波路や、Y分岐光導波路においても、低損失で曲率半径が小さい曲線状の曲がり光導波路や、低損失で分岐角の大きいY分岐光導波路を実現できる構成およびその製造方法を提供するものである。また、これらの光導波路を用いて光フィルタなどの光デバイスを小型化し、光集積回路の集積度を向上させることを目的とする。

【0007】

【課題を解決するための手段】本発明の第1の構成による光導波路は、光導波路の曲がり部または分岐部のコア層の側面に金属クラッド層を設けるとともに、上記金属クラッド層以外の導波路材料を石英系材料で構成し、上記曲がり部または分岐部に、波動インピーダンスマッチング回路と、モードを保存させるモードフィルタとの少なくともいずれか一方を設けたものである。

【0008】本発明の第2の構成による光導波路は、コア層とクラッド層、またはコア層とクラッド層と金属クラッド層により構成された光導波路において、上記光導波路の曲がり部または分岐部におけるコア層の屈折率を、曲げられる方向となる曲率中心側の屈折率が、曲率中心外側の屈折率に比べて大きくなるようにしたものである。

【0009】本発明の第3の構成による光導波路は、第2の構成の光導波路において、曲がり部または分岐部におけるコア層に、少なくとも1個以上の三角形の高屈折率領域を設けて屈折率に分布を持たせたものである。

【0010】本発明の第4の構成による光導波路は、コア層とクラッド層、またはコア層とクラッド層と金属クラッド層により構成された光導波路において、上記光導波路の曲がり部または分岐部におけるコア層に、曲げられる方向に沿ってガウス分布状の屈折率分布をもたせるとともに、上記屈折率分布のピーク位置がコア幅の中心よりも、曲げられる方向となる曲率中心側に位置するようにしたものである。

【0011】本発明の第5の構成による光導波路は、コア層とクラッド層、またはコア層とクラッド層と金属クラッド層により構成された光導波路と、上記光導波路とは幅の異なるコア層を有する光導波路とが接合された光導波路において、接合部のコア層側面に金属クラッド層を設けるとともに、上記接合部を、階段式テーパー形状としたコア構造としたものである。

【0012】本発明の第1の方法による光導波路の製造方法は、光導波路の曲がり部または分岐部のコア層側面に金属クラッド層を設けた光導波路を製造する際に、コ

ア層の側面に金属クラッド層を設けた後に、コア層および金属クラッド層を囲むクラッド層を600℃以下で成膜したものである。

【0013】本発明の第2の方法による光導波路の製造方法は、光導波路の曲がり部または分岐部のコア層側面に金属クラッド層を設けた光導波路を製造する際に、光導波路の曲がり部または分岐部に、コアの側面に沿った溝を形成し、上記溝に金属を充填して製造したものである。

【0014】本発明の第3の方法による光導波路の製造方法は、コア層とクラッド層、またはコア層とクラッド層と金属クラッド層により構成された光導波路において、上記光導波路の曲がり部または分岐部におけるコア層に紫外光を照射し、上記コア層の屈折率に分布を持たせたものである。

【0015】本発明の光デバイスは、第1ないし第5のいずれかの構成による光導波路を使用したものである。

【0016】

【発明の実施の形態】実施の形態1. 図1は波動インピーダンスマッチング回路とモードフィルタを組み合わせた本発明の実施の形態1によるL曲がり光導波路を示す図であり、図1(a)は平面図、図1(b)は図1(a)のb-b線での断面構成図である。図において、1は基板、2は主成分が酸化シリコン( $\text{SiO}_2$ )の石英からなる下クラッド層、3は主成分を酸化シリコンとし、ゲルマニウム(Ge)を約10%ドーピングした石英からなるコア層、4はコア層3の曲がり部に沿うようにコア側面部に成膜した金属クラッド層、5は主成分が酸化シリコンの石英からなる上クラッド層である。光はコア層3に沿って矢印の方向に伝搬する。

【0017】薄膜を成膜する際に用いる気相成長法は、物理的エネルギーを供給して固体表面の原子、分子を解離、気化させて、それを基板上に薄膜として堆積させるPVD(Physical vapor deposition)法と、揮発性物質を原料とし、化学反応を通して固体化するCVD(Chemical vapor deposition)法に大別される。前者においては、基本的には原料の固体と同じ組成を有する薄膜が生成するのに対し、後者では、化学反応を経て分解した原料ガス中の特定の成分を膜として固定する。同一原料を用いても、反応条件により生成する薄膜の組成は大きく変化する。一般にCVD膜は、基板との密着性やまわり込みが良く、複雑な形状の基板にも均一にコーティングできる。また、他の方法と比べて析出速度が大きいので、量産化が比較的容易で生産性が高いなどの長所がある。

【0018】本実施の形態では、オゾン酸化型CVD(Chemical vapor deposition)法で図1のタイプの曲がり光導波路を作製した。図2は本実施の形態1による曲がり光導波路を製造するた

めの成膜装置を示す構成図である。図において、6はキャリアガス導入口、7は流量調節器、8は原料容器、9は反応管、10は酸素ガス導入口、11はオゾナイザ、12は排出口である。図2のCVD装置では3個の原料容器8を備えており、3種類のCVD原料蒸気を同時に基板1上に供給できる。使用した原料は、テトラエチルオルソシリケート(化学式 $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$ ：以下TEOSと略す)、ボロントリプロボキサイド(化学式 $\text{B}(\text{OC}_3\text{H}_7)_3$ ：以下TEBと略す)、ゲルマニウムテトラエソキサイド(化学式 $\text{Ge}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$ ：以下TEGと略す)であった。キャリアガス導入口6から導入し、排出口12から排出するキャリアガスは、高純度アルゴンガスとした。各原料容器8ごとに流量調節器7が付属しており、各原料の蒸気の流量を独立に制御できる。従って、3種類のアルコキシド原料を任意の割合で反応管9内の基板1上へ輸送することができる。各原料の割合によってCVD膜の屈折率を制御できる。酸素ガス導入口10からオゾナイザ11へ酸素ガスを導入し、生成した8%のオゾンを含む酸素ガスを反応管9へ導入すると共に、基板1の温度を300℃として、原料の分解、反応を促進させ、反応管9内に設置した基板1に所望の膜を成膜する。基板1は、3インチ径のシリコン基板を使用した。真空度は50 Torr、成膜速度は10  $\mu\text{m}$ /時間とした。

【0019】本実施の形態では、図3(a)～(f)のプロセス工程を経て曲がり光導波路を作製した。まず、図2に示した成膜装置を用いて、シリコン基板1上にTEOS、TEBの蒸気のみを供給し、図3(a)のように酸化シリコンにボロン(B)を含有した石英からなる下クラッド層2を成膜した。下クラッド層2の厚さは、20  $\mu\text{m}$ 程度とした。このときの下クラッド層2の屈折率は、1.4682であった。次に、TEOSとTEGのアルコキシドを同時に基板1上に供給して、酸化シリコンにゲルマニウムを含有した石英からなるコア膜13を6  $\mu\text{m}$ の厚さに成膜した。コア膜13の成膜では、ゲルマニウム酸化物の含有量が約10%になるように、ゲルマニウムアルコキシドの蒸気の流量調整を行った。基板1の温度は、下クラッド層2の成膜の場合と同一とした。次にコア膜13上に電子ビーム描画を用いた写真製版法により所望の導波路パターンのクロママスク14を作製し、RIEでエッチングして所定の導波路幅のコア層3にパターンニングした(図3(c)(d))。コアの形状は図32(a)のようにした。次に、作製したコア層3の曲がり部分を図3(e)のようにスパッタ法を用いて金属クラッド層4で取り囲む。ここでは金を使用した。銀、白金、銅、アルミニウム、モリブデン、タングステン、タンタル、ニッケル、クロムなども使用できる。金属クラッド層4は、基板1に対して斜め方向からスパッタ法を用いて成膜した。1回の成膜では、片側のクラッドしかできないので、基板の傾き方向を変

えて、複数回成膜することが必要になる。コア層の上面にも多少金属膜が形成されるが、エッチングにより簡単に除去できる。次に、コア層3及び金属クラッド層4の上に、上クラッド層5を成膜する際には金属クラッド層4に損傷を与えずに成膜することが必要となる。上述の種々の金属の内、最も融点の低いアルミニウムの場合で融点は600℃である。よってほとんどの金属の場合、600℃以下の温度では損傷を受けない。そこで、上クラッド層5を成膜する際には600℃以下の温度で成膜するとよい。本実施の形態で用いたオゾン酸化型CVD法では、600℃以下の温度で所望の上クラッド層5が成膜できる。具体的には、コア層3及び金属クラッド層4の上に、酸化シリコンにボロンを含有した上クラッド層5をTEOS+TEBの原料で厚さ20μm程度形成し(図3(f))、光導波路を作製した。この時の基板温度は300℃であった。低温で上クラッド層5を成膜することにより、金属クラッド層4に損傷を与えずに成膜できる。屈折率は、上クラッド層5で、1.4682、ゲルマニウムをドーパしたコア層3で1.4788であり、屈折率差は約0.7%であった。CVD法は、火炎堆積法と異なり、高温(1000℃前後)での熱処理プロセスがなく、比較的低温で石英膜を成膜できるため、金属クラッド層4を有する光導波路を簡単に作製することができた。

【0020】本実施の形態において作製した曲がり光導波路に、波長1.55μmのレーザ光を用いてファイバからの端面結合により縦偏波光導波モードを励起した。導波路内を伝搬し、導波路端面から出射される光は単一モードによるものであった。曲がり導波路全体の損失は0.9dBであり、低損失な結果が得られた。インピーダンスマッチング回路を組み合わせていることより、反射光を低減し、モードフィルタを組み合わせているのでモード変換がないことにより、このような良好な結果が得られたと言える。

【0021】なお、ここでは金属クラッド層4の作製方法として、斜め方向からスパッタする方法を用いたが、図4に示す工程により金属クラッド層4を作製することもできる。図4における工程では、まずコア層3を取り囲むように金属をスパッタ法により成膜し(図4

(a))、その上からボロンを含有した石英膜(上クラッド層5)を成膜した(図4(b))後に、コアの上面が現れるまで研磨する(図4(c))。石英膜がカバーしてから研磨することにより、研磨による金属膜の損傷を防ぐことができる。研磨後は、再度ボロンを含有した石英を成膜することにより(図4(d))、金属クラッド層4がコア層3の側面に接する導波路を作製できる。

【0022】さらに別の方法では、スピンコートしたフォトリソレジストを露光、現像、ウェットエッチングして図5(a)のようにフォトリソレジスト15をコア層3上に成膜する。次に金属を1μmスパッタした後に(図5

(b))、エッチングすれば、レジスト15とその上部の金属膜を取り除くことができる(図5(c))。最後にその上から石英(上クラッド層5)を成膜すれば同様な導波路が作製可能である(図5(d))。

【0023】実施の形態2. 図6は波動インピーダンスマッチング回路とモードフィルタを組み合わせた本発明の実施の形態2によるT分岐光導波路を示す図であり、実施の形態1と同様な方法で作製した分岐光導波路である。なお、図6(a)は平面図、図6(b)は図6

(a)のb-b線での断面構成図である。本実施の形態では、図3(a)~(f)のプロセス行程を経て分岐光導波路を作製した。まず、図2に示した成膜装置を用いて、シリコン基板1上にTEOS、TEBの蒸気のみを供給し、図3(a)のように酸化シリコンにボロン

(B)を含有した石英からなる下クラッド層2を成膜した。下クラッド層2の厚さは、20μm程度とした。このときの下クラッド層2の屈折率は、1.4682であった。次に、TEOSとTEGのアルコキシドを同時に基板1上に供給して、酸化シリコンにゲルマニウムを含有した石英からなるコア膜13を6μmの厚さに成膜した。コア膜13の成膜では、ゲルマニウム酸化物の含有量が約10%になるように、ゲルマニウムアルコキシドの蒸気の流量調整を行った。基板1の温度は、下クラッド層2の成膜の場合と同一とした。次にコア膜13上に電子ビーム描画を用いた写真製版法により所望の導波路パターンクロママスク14を作製し、RIEでエッチングして所定の導波路幅のコア層3にパターニングした(図3(c)(d))。コアの形状は図32(b)のようにした。次に、作製したコア層3の分岐の部分を図3(e)のようにスパッタ法を用いて金属クラッド層4で取り囲む。ここでは金を使用したが、銀、白金、銅、アルミニウム、モリブデン、タングステン、タンタル、ニッケル、クロムなども使用できる。金属クラッド層4は、基板に対して斜め方向からスパッタ法を用いて成膜した。1回の成膜では片側のクラッドしかできないので、基板の傾き方向を変えて、複数回成膜することが必要になる。コア層の上面にも多少金属膜が形成されるが、エッチングにより簡単に除去できる。次に、コア層3及び金属クラッド層4の上に、酸化シリコンにボロンを含有した上クラッド層5をTEOS+TEBの原料で厚さ20μm程度形成し(図3(f))、光導波路を作製した。この時の基板温度は300℃であった。低温で上クラッド層5を成膜することにより、金属クラッド層4に損傷を与えずに成膜できる。

【0024】本実施の形態において作製した分岐光導波路に波長1.55μmのレーザ光を用いてファイバからの端面結合により縦偏波光導波モードを励起した。導波路内を伝搬し、導波路端面から出射される光は単一モードによるものであった。分岐光導波路全体の損失は2.5dBであり、低損失な結果が得られた。インピーダン

スマッチング回路を組み合わせていることより、反射光を低減し、モードフィルタを組み合わせているのでモード変換がないことにより、このような良好な結果が得られたと言える。

【0025】実施の形態3. 本実施の形態では、火炎堆積法を用いて、波動インピーダンススマッチング回路とモードフィルタを組み合わせたL曲がり光導波路を作製した。火炎堆積法ではCVD法に比べて低損失な膜ができるが、実施の形態1、2のように金属クラッド層4を作製した後に上クラッド層5を成膜したのでは、火炎堆積法特有の高温な熱処理工程のため金属クラッド層4が損傷を受ける。そこで光導波路の構成を図1に示す実施の形態1のものとは異なる構成とした。図7は実施の形態3によるL曲がり光導波路を示す図であり、図7(a)は平面図、図7(b)は図7(a)のb-b線での断面構成図である。

【0026】図8は火炎堆積法による成膜装置を示す図であり、16は水素ガス、17はバーナ、18はターンテーブルである。図に示すように、アルゴンガスをキャリアガス導入口6から、塩化シリコン( $\text{SiCl}_4$ )、塩化ボロン( $\text{BCl}_3$ )、塩化ゲルマニウム( $\text{GeCl}_4$ )等の液体原料が収納された原料容器8へ導入し、さらにこれら出発原料を、水素ガス16を用いた酸水素バーナ17へ輸送し、火炎中にて加水分解して微粉末状のボロンを含む酸化シリコンを作製し、これをターンテーブル18上の基板1へ吹き付けて堆積する。なお、各原料容器8ごとに流量調節器7が付属しており、3種類の出発原料を任意の割合で基板1上へ輸送することができる。各原料の割合によって成膜される光導波路膜の厚み方向の屈折率を制御できる。すなわち、火炎堆積の当初はボロンを含む酸化シリコンのみを吹き付け、下クラッド層2を形成し、その後屈折率に応じてゲルマニウムを約10%前後ドーピングしてコア膜を形成する。ただし、酸化シリコンの微粒子膜堆積後、1000から1200℃の温度で透明化のための熱処理を行う必要がある。透明化処理後、スパッタ法や蒸着法により、コア膜上に金属クロム膜を形成し、電子ビーム描画を用いた写真製版法により所望の導波路パターンの金属クロム膜を作製する。その後、RIE(反応性イオンエッチング)法によりコア膜をエッチングして、金属クロム膜で覆われていないコア膜を取り除き、所定の幅のコア3を形成する。その後、再びボロンを含みゲルマニウムを含まない酸化シリコン組成で、火炎堆積法により微粒子を堆積し、高温熱処理をして上クラッド層5を形成して光導波路を作製する。コアの形状は図32(a)のようにした。光導波路の屈折率は、クラッド層が1.4572、コア層が1.4670であり、コア層とクラッド層の屈折率差は0.7%であった。

【0027】このように作製した光導波路に、図9の工程を経て金属クラッド層4を取り付けた。まず、上クラ

ッド層5の上にクロム膜をスパッタ法により成膜し、電子ビーム描画を用いた写真製版法により図9(a)のようにマスクする。次に図9(b)のようにウェットエッチングによりコア側面に沿って上クラッド層を除去し、最後に金属クラッド層4をスパッタ法により成膜する(図9(c))。このように、光導波路作製後に溝を形成し、金属を充填する方法であるので、高温処理が必要な成膜法で上クラッド層5を成膜しても、金属クラッド層4が損傷を受けることはない。

【0028】本実施の形態において作製したL曲がり光導波路に波長1.55 $\mu\text{m}$ のレーザー光を用いて端面結合により縦偏波光導波モードを励起した。導波路内を伝搬し、導波路端面から出射される光は単一モードによるものであり、曲がり光導波路全体の損失は0.5dBであることを確認した。インピーダンススマッチング回路を組み合わせていることより、反射光を低減し、モードフィルタを組み合わせていることよりモード変換がないことにより、また更に、石英系材料からなる膜を、損失の小さな膜を成膜できる火炎堆積法によって成膜したことにより、このような良好な結果が得られたと言える。

【0029】なお、上記実施の形態3と同様な方法で、再度、L曲がり光導波路を作製する際に、コア側面のクラッドをRIEエッチングで落とす工程で、図10に示す様にコア側面にクラッドが0.5ミクロンほど残った。しかし、損失を測定した結果、0.7dB程度であり、0.5ミクロンほどクラッドが残ったとしても、十分低損失な曲がり光導波路が得られることがわかった。

【0030】実施の形態4. 実施の形態3と同様に火炎堆積法を用いて図6のようなT分岐光導波路を作製した。火炎堆積法においては、基板上に当初はボロンを含む酸化シリコンのみを吹き付け、下クラッド層2を形成し、その後屈折率に応じてゲルマニウムを約10%前後ドーピングしてコア膜を形成する。ただし、酸化シリコンの微粒子膜堆積後、1000から1200℃の温度で透明化のための熱処理を行う必要がある。透明化処理後、スパッタ法や蒸着法により、コア膜上に金属クロム膜を形成し、電子ビーム描画を用いた写真製版法により所望の導波路パターンの金属クロム膜を作製する。その後、RIE(反応性イオンエッチング)法によりコア膜をエッチングして、金属クロム膜で覆われていないコア膜を取り除き、所定の幅のコア3を形成する。その後、再びボロンを含みゲルマニウムを含まない酸化シリコン組成で、火炎堆積法により微粒子を堆積し、高温熱処理をして上クラッド層5を形成して光導波路を作製する。コアの形状は図32(b)のようにした。

【0031】このように作製したT分岐光導波路に、図9の工程を経て金属クラッド層4を取り付けた。まず、上クラッド層5の上にクロム膜をスパッタ法により成膜し、電子ビーム描画を用いた写真製版法により図9(a)のようにマスクする。次に図9(b)のようにウ



エッチングによりコア側面に沿って上クラッド層を除去し、最後に金属クラッド層4をスパッタ法により成膜する(図9(c))。このように、光導波路作製後に溝を形成し、金属を充填する方法であるので、高温処理が必要な成膜法で上クラッド層5を成膜しても、金属クラッド層4が損傷を受けることはない。

【0032】本実施の形態において作製した分岐光導波路に波長 $1.55\mu\text{m}$ のレーザー光を用いて端面結合により縦偏波光導波モードを励起した。導波路内を伝搬し、導波路端面から出射される光は単一モードによるものであり、分岐光導波路全体の損失は $1.4\text{dB}$ であることを確認した。インピーダンスマッチング回路を組み合わせていることより、反射光を低減し、モードフィルタを組み合わせていることよりモード変換がないことにより、また更に、石英系材料からなる膜を、損失の小さな膜を成膜できる火炎堆積法によって成膜したことにより、このような良好な結果が得られたと言える。

【0033】実施の形態5. 通常光通信に用いられる石英系直線状光導波路のコア幅は、 $6\sim 8\mu\text{m}$ 程度である。しかし、前述の金属クラッド層4を有するL曲がり光導波路、及びT分岐光導波路のコア幅は、光通信に用いられる波長 $1.55\mu\text{m}$ 帯では $3\mu\text{m}$ 程度となる(コア幅 $=2\lambda$ )。よってそれらの導波路を直接結合したのでは結合損失が大きくなる。本実施の形態は、石英系直線状光導波路と金属クラッド層4を有するL曲がり光導波路との結合部に階段式テーパー構造を用いることにより結合損失を低減させたものである。

【0034】図11は実施の形態5によるL曲がり光導波路を示す図であり、図11(a)は平面図、図11(b)は図11(a)のb-b線での断面構成図である。図12は実施の形態5による石英系直線状光導波路とL曲がり光導波路との結合部を示す図であり、階段式テーパー構造のサイズは上記各実施の形態に示されたL曲がり光導波路及びT分岐光導波路と同様に、波動インピーダンスが整合するように設計する。設計値を図12に示す。

【0035】石英膜の成膜は熱分解CVD法で実施する。熱分解CVD装置は図2に示す装置と同様に3個の原料容器8を備えており、3種類の原料蒸気を同時に基板1上に供給できる。各原料は、温度制御可能な密閉容器8に充填され、原料蒸気の流量調整が正確にできる流量調節器7により、それぞれの蒸気の流量を独立に制御でき、3種類のアルコキシド原料を任意の割合で反応管9内の基板1上へ輸送することが可能である。それによりCVD膜の屈折率を制御できる。反応管9へは、亜酸化窒素ガス( $\text{N}_2\text{O}$ )を導入し、基板1温度を $950^\circ\text{C}$ として、原料の分解・反応を熱により促進させ、設置した基板1に成膜する。基板1は、3インチ径のシリコン基板を使用した。成膜速度は、 $4\mu\text{m}/\text{時間}$ であった。熱分解CVD法は、オゾン酸化CVD法、プラズマCVD

D法等に比べて損失の小さな膜が成膜できる。

【0036】本実施の形態ではまず、オゾン酸化型CVD法の場合と同様に、酸化シリコン中にボロンを含むクラッド層2を $20\mu\text{m}$ 成膜し(原料は $\text{TEOS}+\text{TEB}$ )、その後酸化シリコン中にゲルマニウムを含むコア膜を成膜する(原料は $\text{TEOS}+\text{TEG}$ )。その後、スパッタ法や蒸着法により、コア膜上に金属クロム膜を形成し、電子ビーム描画を用いた写真製版法により所望の導波路パターンの金属クロム膜を作製する。その後、RIE(反応性イオンエッチング)法によりコア膜をエッチングして、金属クロム膜で覆われていないコア膜を取り除き、所定の幅のコア3を形成する。その後、再びボロンを含みゲルマニウムを含まない酸化シリコン組成で、CVD膜を堆積して光導波路を作製する(原料は $\text{TEOS}+\text{TEB}$ )。曲がり部のコアの形状は図32(a)のようにし、曲がり光導波路と石英系直線状光導波路との結合部のコアの形状は図12のようにした。

【0037】このように作製した光導波路に、実施の形態3と同様に、図9に示す工程を経て金属クラッド層4を取り付けた。ただし本実施の形態においては図9の(a)の工程の、クロムマスク14をマスクする際に、図11(a)の金属クラッド層4が存在する領域以外にマスクすれば、図11(a)のような光導波路を形成できる。このような構成にすることにより、曲がり光導波路と石英系直線状光導波路との結合損失を小さくできる。作製した各石英膜の屈折率は、クラッド層で $1.4585$ 、ゲルマニウムをドーピングしたコア層で $1.4710$ であり、屈折率差は約 $0.8\%$ であった。

【0038】本実施の形態において作製した曲がり光導波路に直線状光導波路を通じて縦偏波光導波モードを励起させた。導波路端面から出射される光は単一モードによるものであり、導波路全体の損失は $0.2\text{dB}$ であることを確認した。曲がり光導波路と直線状光導波路との結合部にテーパー構造を作製しなかった場合には損失は $0.5\text{dB}$ であったのでテーパー構造により損失を低減できた。

【0039】なお、本実施の形態は金属クラッド層を有するL曲がり光導波路と石英系直線状光導波路との結合部に関するものであるが、金属クラッド層を有する光導波路とファイバコネクタとの接合部にも同様に実施することができる。金属クラッド層を有する光導波路の端面に階段式テーパー構造を形成し、ファイバコネクタと結合すれば、結合損失を低減させることができる。

【0040】実施の形態6. 図13は実施の形態6によるT分岐光導波路を示す図であり、図13(a)は平面図、図13(b)は図13(a)のb-b線での断面構成図である。本実施の形態は実施の形態5と同様に、石英系直線状光導波路との結合部に、階段式テーパー構造を有するものであり、階段式テーパー構造のサイズは波動インピーダンスが整合するように設計する。本実施の形態

による光導波路は上記実施の形態5と同様に、熱分解CVD法により形成できる。本実施の形態において作製したT分岐光導波路に直線状光導波路を通じて縦偏波光導波モードを励起させた。導波路端面から出射される光は単一モードによるものであり、導波路全体の損失は0.9 dBであることを確認した。T分岐光導波路と直線状光導波路との結合部にテーパ構造を作製しなかった場合には損失は1.4 dBであったのでテーパ構造により損失を低減できた。

【0041】実施の形態7. 図14は実施の形態7による曲がり光導波路を示す図であり、図14(a)は曲がり光導波路を示す平面構成図、図14(b)は断面構成図である。図において、19はコア層3における高屈折率領域を示す。通常の石英系曲線状光導波路が光が透過するとき、光は導波路側面での反射によって曲げられる。しかしその場合、曲率半径を小さくすると、曲線の外側への放射損失が大きくなる。本実施の形態では、放射損失を低減させる目的で曲線状光導波路のコアに屈折率の分布を生じさせ、光導波モードが曲がりやすい構造にした。即ち、自由空間において光がプリズム中を透過すると光は曲げられる。導波路中を伝搬する導波光においても同様に、コア中に屈折率分布が生じていれば導波光はある方向に曲げられる。導波路の曲がっている方向と屈折率分布によって曲げられる方向を同一にすることにより導波光は効率良く曲がり、放射損失は低減される。本実施の形態では曲線状光導波路のコア層3の内側に高屈折率領域19を設け、光を曲がりやすくしたものである。

【0042】本実施の形態ではオゾン酸化型CVD法により、コアにゲルマニウムを含む曲率半径1 mmの石英系曲線状光導波路を作製した。作製方法としてはまず、図2に示した成膜装置を用いて、シリコン基板1上にTEOS、TEBの蒸気のみを供給し、酸化シリコンにボロン(B)を含有した石英からなる下クラッド層2を成膜した。成膜時の温度は500度とした。下クラッド層2の厚さは、20  $\mu$ m程度とした。このときの下クラッド層2の屈折率は、1.4682であった。次に、TEOSとTEGのアルコキシドを同時に基板1上に供給して、酸化シリコンにゲルマニウムを含有した石英からなる高屈折率層(コア膜)を6  $\mu$ mの厚さに成膜した。コア膜の成膜では、ゲルマニウム酸化物の含有量が約10%になるように、ゲルマニウムアルコキシドの蒸気の流量調整を行った。基板1の温度は、下クラッド層2の成膜の場合と同一とした。次にコア膜上に電子ビーム描画を用いた写真製版法により所望の導波路パターンのクロムマスクを作製し、RIEでエッチングして所定の導波路幅のコア層3にパターンニングした。コアの形状は曲線状とした。次に、コア層3上に、酸化シリコンにボロンを含有した上クラッド層5をTEOS+TEBの原料で厚さ20  $\mu$ m程度形成し、光導波路を作製した。この時

の基板温度は500℃であった。屈折率は、上クラッド層5で、1.4682、ゲルマニウムをドーブしたコア層3で1.4788であり、屈折率差は約0.7%であった。石英系の光導波路を作製した後、紫外光(エキシマレーザ、KrF:波長248 nm)を曲線状光導波路に照射すると、紫外光が当たったコア部分の屈折率が大きくなる。これは、強い光エネルギーにより作製されたカラーセンターで屈折率が変化する現象である。適当な形状の金属製マスクを通して紫外光をコア層3に照射することにより、コア層3に任意の屈折率分布を生じさせることができる。金属製マスクを通して紫外光を照射した曲線状光導波路は図14(a)のような構成となり、光は屈折率の高い方向へ屈折する性質があるので、コアに沿って光導波モードが曲がりやすくなり、放射損失が小さくなる。

【0043】以上のようにして高屈折率領域19を設けることにより、屈折率分布がない場合には光導波路の曲がりによる損失は3.5 dBであったものが、屈折率分布がある場合には1.3 dBとなり、屈折率分布の効果が得られた。

【0044】実施の形態8. 図15は実施の形態8による曲がり光導波路を示す図であり、図15(a)は曲がり光導波路を示す平面構成図、図15(b)は断面構成図である。図において、19はコア層3における高屈折率領域を示す。本実施の形態では、実施の形態7と同様に、石英系曲線状光導波路のコア層3に屈折率分布を形成したものを作製した。ただしここでは、屈折率分布の形状を図15(a)に示すように三角形状とした。

【0045】本実施の形態ではオゾン酸化型CVD法により、コアにゲルマニウムを含む曲率半径1 mmの石英系曲線状光導波路を作製した。作製方法としてはまず、図2に示した成膜装置を用いて、シリコン基板1上にTEOS、TEBの蒸気のみを供給し、酸化シリコンにボロン(B)を含有した石英からなる下クラッド層2を成膜した。成膜時の温度は500度とした。下クラッド層2の厚さは、20  $\mu$ m程度とした。このときの下クラッド層2の屈折率は、1.4682であった。次に、TEOSとTEGのアルコキシドを同時に基板1上に供給して、酸化シリコンにゲルマニウムを含有した石英からなる高屈折率層(コア膜)を6  $\mu$ mの厚さに成膜した。コア膜の成膜では、ゲルマニウム酸化物の含有量が約10%になるように、ゲルマニウムアルコキシドの蒸気の流量調整を行った。基板1の温度は、下クラッド層2の成膜の場合と同一とした。次にコア膜上に電子ビーム描画を用いた写真製版法により所望の導波路パターンのクロムマスクを作製し、RIEでエッチングして所定の導波路幅のコア層3にパターンニングした。コアの形状は曲線状とした。次に、コア層3上に、酸化シリコンにボロンを含有した上クラッド層5をTEOS+TEBの原料で厚さ20  $\mu$ m程度形成し、光導波路を作製した。この時

の基板温度は500℃であった。屈折率は、上クラッド層5で、1.4682、ゲルマニウムをドーパしたコア層3で1.4788であり、屈折率差は約0.7%であった。作製した曲率半径1mmの石英系曲線状光導波路のコア層3に、実施の形態7と同様な方法で屈折率分布を生じさせた。ただし、屈折率分布の形状は図15に示すように三角形とした。コア層3に紫外光を照射する際に、コア層3の曲線に沿い三角形の穴が、無数にいた金属製マスクを通して照射すれば、図15のような屈折率分布が得られる。

【0046】このように多数の三角形の高屈折率領域19を設けることにより、曲線状のコア層3の内側と外側とで屈折率分布が生じ、累積としての光の屈折は大きなものとなり、紫外光照射による屈折率変化量が小さくとも大きな屈折の効果が得られる。屈折の効果により導波光の放射損失は低減され、屈折率分布を生じさせなかった場合は曲線部による損失は3.5dBであったものが、屈折率分布を生じさせた場合には0.5dBとなった。

【0047】実施の形態9。図16は実施の形態9によるY分岐光導波路を示す図であり、図において、19はコア層3における高屈折率領域を示す。通常の石英系Y分岐光導波路において、その分岐角を大きくすると、分岐部での散乱損失が大きくなる。本実施の形態では、散乱損失を低減させる目的で30度の分岐角を有するY分岐光導波路のコア層3に三角形の屈折率の分布を生じさせ、光導波モードが分岐しやすい構造にした。即ち、実施の形態7、8と同様に、コア層中に高屈折率領域を設け、屈折率分布を生じさせれば導波光はある方向に曲げられる。導波路の分岐方向と屈折率分布によって曲げられる方向を同一にすることにより導波光は効率良く分岐し、散乱損失は低減される。

【0048】本実施の形態ではオゾン酸化型CVD法により、コアにゲルマニウムを含む石英系Y分岐光導波路を作製した。作製方法としてはまず、図2に示した成膜装置を用いて、シリコン基板1上にTEOS、TEBの蒸気のみを供給し、酸化シリコンにボロン(B)を含有した石英からなる下クラッド層2を成膜した。成膜時の温度は500度とした。下クラッド層2の厚さは、20μm程度とした。このときの下クラッド層2の屈折率は、1.4682であった。次に、TEOSとTEGのアルコキシドを同時に基板1上に供給して、酸化シリコンにゲルマニウムを含有した石英からなる高屈折率層(コア膜)を6μmの厚さに成膜した。コア膜の成膜では、ゲルマニウム酸化物の含有量が約10%になるように、ゲルマニウムアルコキシドの蒸気の流量調整を行った。基板1の温度は、下クラッド層2の成膜の場合と同一とした。次にコア膜上に電子ビーム描画を用いた写真製版法により所望の導波路パターンのクロムマスクを作製し、RIEでエッチングして所定の導波路幅のコア層

3にパターンニングした。コアの形状は図16のようにY分岐とした。次に、コア層3上に、酸化シリコンにボロンを含有した上クラッド層5をTEOS+TEBの原料で厚さ20μm程度形成し、光導波路を作製した。この時の基板温度は500℃であった。作製したY分岐光導波路のコア層3に、実施の形態7と同様な方法で屈折率分布を生じさせた。ただし、屈折率分布の形状は図16のように三角形とした。コア層3に紫外光を照射する際に、所望の形状の穴があいた金属製マスクを通して照射すれば、図16のような屈折率分布が得られる。

【0049】このように分岐部に多数の三角形の高屈折率領域19を設けて、コア層3に屈折率分布を生じさせることにより、光が分岐しやすくなり、導波光の散乱損失は低減される。屈折率分布を生じさせなかった場合は分岐部での損失は4.1dBであったものが、屈折率分布を生じさせた場合には2.1dBとなった。

【0050】実施の形態10。通常の曲線状光導波路を伝搬する光導波モードの磁界強度分布は、図17(a)に示すように、曲率中心の外側へ大きくしみ出す。このしみ出しが大きくなるほど放射損失は増加する。本実施の形態は、石英系曲線状光導波路のコア層3に屈折率分布を生じさせ、上記磁界強度分布のしみ出しを減少させて放射損失を低減するものである。

【0051】本実施の形態ではまず、実施の形態7、8と同様に、オゾン酸化型CVD法により、コアにゲルマニウムを含む曲率半径1mmの石英系曲線状光導波路を作製した。作製した曲率半径1mmの石英系曲線状光導波路のコア層3に、コア幅程度のビーム幅で、ガウス分布型のビームプロファイルを有する紫外光をコアに照射し、それを曲線状のコアに沿ってゆっくりと移動させた。また、紫外光の照射位置は、コア幅の中心よりも、ビームの中心をやや曲率中心側に位置するように照射するようにした。このようにすることにより、コアの屈折率変化量は、紫外光の強度が大きいほど大きくなるので、ビームプロファイルを反映した、図17(b)に示す様なガウス分布状の屈折率分布が得られる。また、コア幅の中心よりも、ビームの中心をやや曲率中心側に位置するように照射したので、コアの曲率中心側の屈折率の方が曲率中心外側の屈折率よりも大きくなる。このような屈折率分布を作製することにより、光導波モードの磁界強度分布は、図17(b)に示すように、曲線状光導波路の曲率中心側にシフトされ、放射損失は低減される。

【0052】このようにコア層3の曲がり部に屈折率分布を生じさせることにより、屈折率分布を生じさせなかった場合は曲線部での損失は3.5dBであったものが、屈折率分布を生じさせた場合には0.4dBとなった。

【0053】実施の形態11。図18は実施の形態11による曲がり光導波路を示す図であり、図18(a)は

曲がり光導波路を示す平面図、図18(b)は断面図である。本実施の形態では、金属クラッド層4と、高屈折率領域19を設けたコア層3を組み合わせた、曲率半径0.3mmの曲線状光導波路を示す。高屈折率領域19のみ設け、金属クラッド層4を設けない実施の形態8のものに比べ、本実施の形態のものは、多少製造プロセスは増えるが、放射損失が発生し難くなるため、曲線状光導波路の曲率半径を小さくできる。

【0054】本実施の形態では火炎堆積法により、曲線状光導波路を作製する。作製方法としては、まず図8に示した成膜装置を用いて、シリコン基板1上に、当初はボロンを含む酸化シリコンのみを吹き付け、下クラッド層2を形成し、その後屈折率に応じてゲルマニウムを約10%前後ドーピングしてコア膜を形成する。ただし、酸化シリコンの微粒子膜堆積後、1000から1200℃の温度で透明化のための熱処理を行う必要がある。透明化処理後、スパッタ法や蒸着法により、コア膜上に金属クロム膜を形成し、電子ビーム描画を用いた写真製版法により所望の導波路パターン(曲線状)の金属クロム膜を作製する。その後、RIE(反応性イオンエッチング)法によりコア膜をエッチングして、金属クロム膜で覆われていないコア膜を取り除き、所定の幅のコア層3を形成する。その後、再びボロンを含みゲルマニウムを含まない酸化シリコン組成で、火炎堆積法により微粒子を堆積し、高温熱処理をして上クラッド層5を形成して光導波路を作製する。光導波路の屈折率は、クラッド層が1.4572、コア層が1.4670であり、コア層とクラッド層の屈折率差は0.7%であった。作製した光導波路に、図9の工程を経て金属クラッド層4を取り付けた。まず、上クラッド層5の上にクロム膜をスパッタ法により成膜し、電子ビーム描画を用いた写真製版法により図9(a)のようにマスクする。次に図9(b)のようにウェットエッチングによりコア側面に沿って上クラッド層を除去し、最後に金属クラッド層4をスパッタ法により成膜する(図9(c))。光導波路作製後に溝を形成し、金属を充填する方法であるので、高温処理が必要な成膜法で上クラッド層5を成膜しても、金属クラッド層4が損傷を受けることはない。このように作製した曲線状光導波路に、実施の形態8と同様にして、金属マスクを通して紫外光を照射する方法で、図18のような三角形の屈折率分布を生じさせた。

【0055】金属クラッド層4と、高屈折率領域19を設けたコア層3を組み合わせた、本実施の形態による曲がり光導波路において、導波光の散乱損失は低減され、金属クラッド層4及び高屈折率領域19を作製する前の曲がり部における損失は5.5dBであったものが、作製後には1.3dBとなった。

【0056】実施の形態12. 図19は実施の形態12によるY分岐光導波路を示す図であり、金属クラッド層4と、高屈折率領域19を設けたコア層3を組み合わせ

た、分岐角60度のY分岐光導波路を示す。

【0057】本実施の形態では火炎堆積法により、Y分岐光導波路を作製する。作製方法としては、まず図8に示した成膜装置を用いて、シリコン基板1上に、当初はボロンを含む酸化シリコンのみを吹き付け、下クラッド層2を形成し、その後屈折率に応じてゲルマニウムを約10%前後ドーピングしてコア膜を形成する。ただし、酸化シリコンの微粒子膜堆積後、1000から1200℃の温度で透明化のための熱処理を行う必要がある。透明化処理後、スパッタ法や蒸着法により、コア膜上に金属クロム膜を形成し、電子ビーム描画を用いた写真製版法により所望の導波路パターン(曲線状)の金属クロム膜を作製する。その後、RIE(反応性イオンエッチング)法によりコア膜をエッチングして、金属クロム膜で覆われていないコア膜を取り除き、所定の幅のコア層3を形成する。その後、再びボロンを含みゲルマニウムを含まない酸化シリコン組成で、火炎堆積法により微粒子を堆積し、高温熱処理をして上クラッド層5を形成して光導波路を作製する。光導波路の屈折率は、クラッド層が1.4572、コア層が1.4670であり、コア層とクラッド層の屈折率差は0.7%であった。作製した光導波路に、図9の工程を経て金属クラッド層4を取り付けた。まず、上クラッド層5の上にクロム膜をスパッタ法により成膜し、電子ビーム描画を用いた写真製版法により図9(a)のようにマスクする。次に図9(b)のようにウェットエッチングによりコア側面に沿って上クラッド層を除去し、最後に金属クラッド層4をスパッタ法により成膜する(図9(c))。光導波路作製後に溝を形成し、金属を充填する方法であるので、高温処理が必要な成膜法で上クラッド層5を成膜しても、金属クラッド層4が損傷を受けることはない。このように作製したY分岐光導波路に、実施の形態9と同様にして、金属マスクを通して紫外光を照射する方法で、図19のような三角形の屈折率分布を生じさせた。

【0058】金属クラッド層4と、高屈折率領域19を設けたコア層3を組み合わせた、本実施の形態によるY分岐光導波路において、導波光の散乱損失は低減され、金属クラッド層4及び高屈折率領域19を作製する前の分岐部における損失は7.2dBであったものが、作製後には1.5dBとなった。

【0059】実施の形態13. 図20(a)は、実施の形態3によるL曲がり光導波路を適用した、マッハツエング型光フィルタを示す構成図である。図において、20~23はポート、24a、24bはカプラ、25はグレーティングである。幅6μmのコアからなる2個の3dBカプラ24aと24bと間に5mm長のグレーティング25を形成している。グレーティング25は、コア層の屈折率が周期的に変化しているものであり、その周期とマッチングする光のみが反射され、その他の光は透過する。ポート20から入射した光は左側の3dBカプ

ラ24aで2分岐され、グレーティング25を透過する光は右側の3dBカプラ24bで合波されてポート23から出力される。グレーティング25で反射される光はポート21から出力される。ポート22から入射した光は左側の3dBカプラ24bで2分岐され、グレーティング25を透過する光は左側の3dBカプラ24aで合波されてポート21から出力される。グレーティング25で反射される光はポート23から出力される。このような光フィルタは、波長多重通信における光信号の合分波器などに使用される。

【0060】本実施の形態では石英系光導波路を火炎堆積法により作製した。まず、シリコン基板上に当初はボロンを含む酸化シリコンのみを吹き付け、下クラッド層を形成し、その後屈折率に応じてゲルマニウムを約10%前後ドーピングしてコア膜を形成する。ただし、酸化シリコンの微粒子堆積後、1000から1200℃の温度で透明化のための熱処理を行う必要がある。透明化処理後、スパッタ法や蒸着法により、コア膜上に金属クロム膜を形成し、電子ビーム描画を用いた写真製版法により所望の導波路パターン（マッハツェンダ型）の金属クロム膜を作製する。その後、RIE（反応性イオンエッチング）法によりコア膜をエッチングして、金属クロム膜で覆われていないコア膜を取り除き、所定の幅のコア層を形成する。その後、再びボロンを含みゲルマニウムを含まない酸化シリコン組成で、火炎堆積法により微粒子を堆積し、高温熱処理をして上クラッド層を形成して光導波路を作製する。コアの曲がり部の形状は図32

(a) のようにした。光導波路の屈折率は、クラッド層が1.4572、コア層が1.4670であり、コア層とクラッド層の屈折率差は0.7%であった。

【0061】このように作製した導波路に、図9の工程を経て金属クラッド層を取り付けた。まず、上クラッド層の上にクロム膜をスパッタ法により成膜し、電子ビーム描画を用いた写真製版法により図9(a)のようにマスクする。次に図9(b)のようにウエットエッチングによりコア側面に沿って上クラッド層を除去し、最後に金属クラッド層をスパッタ法により成膜する(図9

(c))。光導波路作製後に溝を形成し、金属を充填する方法であるので、高温処理が必要な成膜法で上クラッド層を成膜しても、金属クラッド層が損傷を受けることはない。その後、回折格子を有するガラス板を通し、紫外光をカプラ間の直線状光導波路部に照射する。これによりコア上にグレーティング25が作製される。作製した本実施の形態のマッハツェンダ型光フィルタの波長特性は、エルビウムドーピング型ファイバンプの広帯域光源を使用して測定した。図20(b)は、本実施の形態で作製したマッハツェンダ型光フィルタの波長特性を表す図である。図において、横軸は波長(nm)、縦軸は光強度(dB)で、フィルタ特性は、中心波長が1567nm、帯域が1.8nm、消光比25dBであった。ま

た、中心波長での素子としての挿入損失は2.5dBと、低損失な値が得られた。素子の大きさは、長さ7mmとなり、通常の曲線状光導波路を用いた場合に比べ、1/3に縮小できた。

【0062】実施の形態14. 図21は、上記実施の形態1または3によるL曲がり光導波路と複数の半導体レーザ等を組み合わせた光集積回路であり、コア層及びクラッド層は半導体により形成される。個々の半導体レーザからの光は同一基板上で合波される。図21(a)は平面構成図、図21(b)は断面構成図である。なお、理解を容易にするために、一部の構成要素を省略している。図21において、70はn型化合物半導体基板、71は半導体層(この部分でレーザ発振を行うので以下「半導体レーザ部」という)、72は半導体層(この部分は光の合波機能を有するので、以下「合波器部」という)、73は半導体層(この部分は光を増幅する機能を有するので、以下「半導体アンプ部」という)、74は半導体層90および回折格子78上に形成されたp型半導体層(光を閉じこめる効果があるので以下クラッド層という)、75は半導体レーザ部71上に設けられた半導体レーザ電極、76は半導体アンプ部73上に設けられた半導体アンプ電極、77は化合物半導体基板70の下部に設けられた電極、78は半導体レーザ部71に近接して設けられた回折格子、4は曲がり光導波路の周りに形成された金属クラッド層である。

【0063】次に動作について説明する。まず、半導体レーザ電極75と電極77の間に電流を流すと、半導体レーザ部71に電子と正孔が注入され、この電子と正孔が結合すると、光が発生する。この光のうち、回折格子78の周期に応じた特定の波長のみが増幅反射され、十分高い電流を流すと最後にはレーザ発振を起こす。この際、各回折格子78の周期をわずかに変えておくと、各半導体レーザ部71が、それぞれ波長の異なるレーザ光を発する。それぞれの光は合波器部72を通り、合波される。合波器部72の禁制帯幅が半導体レーザ部71のそれと同じ場合は、1cm当たり1000dB程度の損失を受けるが、垂直に曲がる導波路を用いることにより合波器部72での光路を短くできるので、合波器部72の損失を1cm当たり数十dB程度に抑えられる。合波された光は半導体アンプ部73を通り、右端から出射される。半導体アンプ部電極76及び電極77間に電流を流せば光は増幅されて出射される。このように半導体アンプ部73及び垂直に曲がる光導波路を組み合わせることにより、光集積回路の損失を抑えられ、半導体レーザ部、合波器部、半導体アンプ部の禁制帯幅を同一にできるので、一括して半導体層を形成でき、低コストで高密度な光集積回路の製造が容易となる。

【0064】次に、インジウムリン系の光集積回路を例にして、上記実施の形態に示したものの製造方法について説明する。まず、図22(a)に示すように、n型イ

ンジウムリン基板70上に、半導体レーザ部、合波器部、及び半導体アンプ部となる半導体層80、および回折格子となる半導体層90を有機金属気相成長法(MOCVD)を用いて順次形成する。ここで、半導体層80は、レーザ特性を向上させるため、多重量子井戸構造とする。この多重量子井戸構造は、例えば、厚さ300Åのn型インジウム0.82ガリウム0.18砒素0.39リン0.61、厚さ80Åのアンドーアインジウム0.47ガリウム0.53砒素(7層)、アンドーアインジウム0.82ガリウム0.18砒素0.39リン0.61(6層)、p型インジウム0.82ガリウム0.18砒素0.39リン0.61からなる。また、半導体層90は、厚さ200Åのp型インジウム0.78ガリウム0.22砒素0.47リン0.53からなる。次に、図22(b)に示すように、半導体レーザ部に近接する半導体層90に周期約2400Åの回折格子78を形成する。次に、図22(c)に示すように、再びMOCVD法を用いて回折格子78及び半導体層90上にp型インジウムリンクラッド層74を形成する。次に、図23(a)(b)に示すように、写真製版技術を用いてパターンニングを行い、ブロムメタノール液を用いてエッチングして、半導体レーザ部71、合波器部72、半導体アンプ部73を形成する。次に図23(c)に示すように、再びMOCVD法を用いてFeドーピングインジウムリン電流ブロック層81を形成する。次に図23(d)に示すように合波器部72の曲がり光導波路の周りに電子ビーム描画による写真製版技術とエッチングを用いて溝を形成し、その後スパッタ法、蒸着法等により金属クラッド層4を充填させる。曲がり光導波路の詳細な形状は図32(a)のようにした。次に、図24(a)(b)に示すように、半導体基板70の下部に電極77を、半導体レーザ部71の上部に半導体レーザ電極75を、半導体アンプ部73の上部に半導体アンプ電極76を形成して光集積回路が完成する。なお、図24(a)は半導体アンプ部73の断面図を、図24(b)は半導体レーザ部71の断面図をそれぞれ示している。合波器部72に、垂直に曲がる光導波路を用いることにより、合波器部72の長さを従来の1/10に縮小できた。また合波器部の損失は半導体レーザ部と同じ禁制帯幅の材料を用いているにもかかわらず、5dB程度と十分実用に耐えうる結果が得られた。

【0065】なお、上記実施の形態14では、半導体レーザ部71、合波器部72、半導体アンプ部73それぞれの半導体材料の禁制帯幅が同じであったが、合波器部72の半導体の禁制帯幅を、半導体レーザ部71および半導体アンプ部73のものより大きくすることもできる。それにより合波器部72の損失を低減できる。このような構成は従来から用いられているエッチング法や、選択成長法を用いれば、容易に実施できる。また、上記実施の形態における光集積回路は、半導体レーザ部、合

波器部、半導体アンプ部からなっていたが、半導体レーザ部、合波器部のみからでも同様に実施することができる。半導体アンプ部を除くことにより素子の作製が簡単になる。

【0066】実施の形態15. 図25(a)は、上記実施の形態7の屈折率分布を有するコア層から構成された曲線状曲がり光導波路を適用したマッハツェンダ型光フィルタを示す図である。幅6μmのコアからなる2個の3dBカプラ24aと24bと間に5mm長のグレーティング25を形成している。グレーティング25は、コア層の屈折率が周期的に変化しているものであり、その周期とマッチングする光のみが反射され、その他の光は透過する。ポート20から入射した光は左側の3dBカプラ24aで2分岐され、グレーティング25を透過する光は右側の3dBカプラ24bで合波されてポート23から出力される。グレーティング25で反射される光はポート21から出力される。ポート22から入射した光は左側の3dBカプラ24bで2分岐され、グレーティング25を透過する光は左側の3dBカプラ24aで合波されてポート21から出力される。グレーティング25で反射される光はポート23から出力される。このような光フィルタは、波長多重通信における光信号の合分波器などに使用される。

【0067】本実施の形態では石英系光導波路を火炎堆積法により作製した。まず、シリコン基板上に当初はボロンを含む酸化シリコンのみを吹き付け、下クラッド層を形成し、その後屈折率に応じてゲルマニウムを約10%前後ドーピングしてコア膜を形成する。ただし、酸化シリコンの微粒子膜堆積後、1000から1200℃の温度で透明化のための熱処理を行う必要がある。透明化処理後、スパッタ法や蒸着法により、コア膜上に金属クロム膜を形成し、電子ビーム描画を用いた写真製版法により所望の導波路パターン(マッハツェンダ型)の金属クロム膜を作製する。その後、RIE(反応性イオンエッチング)法によりコア膜をエッチングして、金属クロム膜で覆われていないコア膜を取り除き、所定の幅のコア層を形成する。その後、再びボロンを含みゲルマニウムを含まない酸化シリコン組成で、火炎堆積法により微粒子を堆積し、高温熱処理をして上クラッド層を形成して光導波路を作製する。コアの曲がり部Aの形状は図25(a)の拡大部のようにした。光導波路の屈折率は、クラッド層が1.4572、コア層が1.4670であり、コア層とクラッド層の屈折率差は0.7%であった。

【0068】このようにして石英系の光導波路を作製した後、紫外光(エキシマレーザ、KrF:波長248nm)を光導波路の曲線状曲がり部に照射すると、紫外光が当たったコア部分の屈折率が大きくなる。これは、強い光エネルギーにより作製されたカラーセンターで屈折率が変化する現象である。適当な形状の金属製マスクを



通して紫外光をコア層3に照射することにより、コア層3に任意の屈折率分布を生じさせることができる。本実施の形態では曲線状光導波路のコア層3の内側に高屈折率領域19を設け、光を曲がりやすくした。金属製マスクを通して紫外光を照射した曲線状光導波路は図25

(a)のような構成となり、光は屈折率の高い方向へ屈折する性質があるので、コアに沿って光導波モードが曲がりやすくなり、放射損失が小さくなる。その後、回折格子を有するガラス板を通し、紫外光をカプラ間の直線導波路部に照射する。それによりコア上にグレーティング25が作製される。

【0069】作製した本実施の形態のマッハツエンダ型光フィルタの波長特性は、エルビウムドープ型ファイバアンプの広帯域光源を使用して測定した。図25(b)は、本実施の形態で作製したマッハツエンダ型光フィルタの波長特性を表す図である。図において、横軸は波長(nm)、縦軸は光強度(dB)で、フィルタ特性は、中心波長が1567nm、帯域が1.8nm、消光比25dBであった。また、中心波長での素子としての挿入損失は2.2dBと、低損失な値が得られた。また、コア層3に屈折率分布を生じさせ、曲線部の曲率半径を小さくできたことにより、素子の大きさは長さ10mmとなり、通常の曲線状光導波路を用いた場合に比べ1/2に縮小できた。

【0070】実施の形態16. 図26(a)は、上記実施の形態8の屈折率分布を有するコア層から構成された、曲線状曲がり光導波路を適用したマッハツエンダ型光スイッチを示す図である。幅6 $\mu$ mのコアからなる2個の3dBカプラ24aと24bと間の直線導波路部において、片側のコア上部のクラッド表面に電極26を形成している。光がポート20から入射されると、通常左側の3dBカプラ24aで2分岐され、それぞれの直線導波路部を伝搬し、右側の3dBカプラ24bで合波されてポート23から出力される。しかし電極26に電圧をかけて熱を加えることにより、熱が加えられた導波路の屈折率が変化し、直線導波路部を伝搬する光の位相がずれ、右側の3dBカプラ部24bで合波された光がポート22から出力される。このように、電極26にかけ電圧をON、OFFして光路を切り換える、光スイッチの機能を有する。

【0071】以下に、作製方法を記述する。オゾン酸化型CVD法により、コアにゲルマニウムを含む曲率半径1mmの石英系曲線状光導波路を作製した。作製方法としてはまず、図2に示した成膜装置を用いて、シリコン基板1上にTEOS、TEBの蒸気のみを供給し、酸化シリコンにボロン(B)を含有した石英からなる下クラッド層2を成膜した。成膜時の温度は500度とした。下クラッド層2の厚さは、20 $\mu$ m程度とした。このときの下クラッド層2の屈折率は、1.4682であった。次に、TEOSとTEGのアルコキシドを同時に基

板1上に供給して、酸化シリコンにゲルマニウムを含有した石英からなるコア膜を6 $\mu$ mの厚さに成膜した。コア膜の成膜では、ゲルマニウム酸化物の含有量が約10%になるように、ゲルマニウムアルコキシドの蒸気の流量調整を行った。基板の温度は、下クラッド層の成膜の場合と同一とした。次に、コア膜上に電子ビーム描画を用いた写真製版法により所望の導波路パターンのクロムマスクを作製し、RIEでエッチングして所定の導波路幅のコア層にパターンニングした。コアの形状は図26

(a)のようにマッハツエンダ型とした。次に、コア上に、酸化シリコンにボロンを含有した上クラッド層をTEOS+TEBの原料で厚さ20 $\mu$ m程度形成し、光導波路を作製した。この時の基板温度は500℃であった。屈折率は、上クラッド層で、1.4682、ゲルマニウムをドープしたコア層で1.4788であり、屈折率差は約0.7%であった。作製した石英系曲線状光導波路のコア層に、実施の形態8と同様な方法で三角形の多数の高屈折率領域19を形成した。コアに紫外光を照射する際に、コアの曲線に沿い三角形の穴が、無数にあいた金属製マスクを通して照射すれば、図26

(a)のような屈折率分布が得られる。このように多数の三角形の屈折率分布を構成することにより、累積としての光の屈折は大きなものとなり、紫外光照射による屈折率変化量が小さくとも大きな屈折の効果が得られ、損失は低減される。

【0072】次にスイッチの機能を付加するために、3dBカプラ部間の直線導波路部の片側のコア上部のクラッド表面にクロム膜による電極26を作製した。電極26は、写真製版法を用いて作製した。ポート20から光を入射し、電極に電圧を印加したときのスイッチング特性を図26(b)に示す。スイッチングに必要なパワーは約0.4wであった。コア層に屈折率分布を生じさせたことにより、損失は3dB程度低減された。また、曲線部の曲率半径を小さくできたことにより、素子の大きさは長さ10mmとなり、通常の曲線状光導波路を用いた場合に比べ1/2に縮小できた。

【0073】実施の形態17. 図27(a)は、上記実施の形態10の屈折率分布を有するコア層から構成された、曲線状曲がり光導波路を適用したマッハツエンダ型光スイッチを示す図である。幅6 $\mu$ mのコアからなる2個の3dBカプラ24aと24bと間の直線導波路部において、片側のコア上部のクラッド表面に電極26を形成している。光がポート20から入射されると、通常左側の3dBカプラ24aで2分岐され、それぞれの直線導波路部を伝搬し、右側の3dBカプラ24bで合波されてポート23から出力される。しかし電極26に電圧をかけて熱を加えることにより、熱が加えられた導波路の屈折率が変化し、直線導波路部を伝搬する光の位相がずれ、右側の3dBカプラ部24bで合波された光がポート22から出力される。このように、電極26にかけ

る電圧をON, OFFして光路を切り換える、光スイッチの機能を有する。

【0074】以下に、作製方法を記述する。オゾン酸化型CVD法により、コアにゲルマニウムを含む曲率半径1mmの石英系曲線状光導波路を作製した。作製方法としてはまず、図2に示した成膜装置を用いて、シリコン基板1上にTEOS、TEBの蒸気のみを供給し、酸化シリコンにボロン(B)を含有した石英からなる下クラッド層2を成膜した。成膜時の温度は500度とした。下クラッド層2の厚さは、20 $\mu$ m程度とした。このときの下クラッド層2の屈折率は、1.4682であった。次に、TEOSとTEGのアルコキシドを同時に基板1上に供給して、酸化シリコンにゲルマニウムを含有した石英からなるコア膜を6 $\mu$ mの厚さに成膜した。コア膜の成膜では、ゲルマニウム酸化物の含有量が約10%になるように、ゲルマニウムアルコキシドの蒸気の流量調整を行った。基板の温度は、下クラッド層の成膜の場合と同一とした。次に、コア膜上に電子ビーム描画を用いた写真製版法により所望の光導波路パターンのクロムマスクを作製し、RIEでエッチングして所定の導波路幅のコア層にパターンニングした。コアの形状は図27(a)のようにマハツェンタ型とした。次に、コア上に、酸化シリコンにボロンを含有した上クラッド層をTEOS+TEBの原料で厚さ20 $\mu$ m程度形成し、光導波路を作製した。この時の基板温度は500℃であった。屈折率は、上クラッド層で、1.4682、ゲルマニウムをドーブしたコア層で1.1788であり、屈折率差は約0.7%であった。本実施の形態では、作製した石英系曲線状光導波路のコア層に、実施の形態10と同様な方法で、コア幅程度のビーム幅で、ガウス分布型のビームプロファイルを有する紫外光を照射し、それを曲線状のコアに沿ってゆっくりと移動させた。また、紫外光の照射位置は、コア幅の中心よりも、ビームの中心をやや曲率中心側に位置するように照射するようにした。このようにすることにより、コアの屈折率変化量は、紫外光の強度が大きいほど大きくなるので、ビームプロファイルを反映した、図17(b)に示す様なガウス分布状の屈折率分布が得られる。また、コア幅の中心よりも、ビームの中心をやや曲率中心側に位置するように照射したので、コアの曲率中心側の屈折率の方が曲率中心外側の屈折率よりも大きくなる。このような屈折率分布を作製することにより、光導波モードの磁界強度分布は、図17(b)に示すように、曲線状光導波路の曲率中心側にシフトされ、放射損失は低減される。

【0075】次にスイッチの機能を付加するために、3dBカプラ部間の直線導波路部の片側のコア上部のクラッド表面にクロム膜による電極26を作製した。電極26は、写真製版法を用いて作製した。ポート20から光を入射し、電極26に電圧を印加したときのスイッチング特性を図27(b)に示す。スイッチングに必要なパ

ワーは約0.4wであった。コア3に屈折率分布を生じさせたことにより、損失は4dB程度低減された。また、曲線部の曲率半径を小さくできたことにより、素子の大きさは長さ10mmとなり、通常の曲線状光導波路を用いた場合に比べ1/2に縮小できた。

【0076】実施の形態18. 本実施の形態では、実施の形態11、12に記述した曲がり及び分岐光導波路を使用した図28のような光パワー分配器を作製した。光パワー分配器は、光信号を分配するときなどに必要なデバイスである。

【0077】まず、火炎堆積法により石英系材料からなる光導波路を作製する。シリコン基板上に、当初はボロンを含む酸化シリコンのみを吹き付け、下クラッド層を形成し、その後屈折率に応じてゲルマニウムを約10%前後ドーブしてコア膜を形成する。ただし、酸化シリコンの微粒子膜堆積後、1000から1200℃の温度で透明化のための熱処理を行う必要がある。透明化処理後、スパッタ法や蒸着法により、コア膜上に金属クロム膜を形成し、電子ビーム描画を用いた写真製版法により所望の導波路パターン(図28参照)の金属クロム膜を作製する。その後、RIE(反応性イオンエッチング)法によりコア膜をエッチングして、金属クロム膜で覆われていないコア膜を取り除き、所定の幅のコア層を形成する。その後、再びボロンを含みゲルマニウムを含まない酸化シリコン組成で、火炎堆積法により微粒子を堆積し、高温熱処理をして上クラッド層を形成して光導波路を作製する。光導波路の屈折率は、クラッド層が1.4572、コア層が1.4670であり、コアとクラッドの屈折率差は0.7%であった。作製した曲線状光導波路に、金属マスクを通して紫外光を照射する方法で、曲がり部A及び分岐部Bに図28の拡大部に示すような三角形の屈折率分布を生じさせた。

【0078】曲がり部A及び分岐部Bにはさらに、図9の工程を経て金属クラッド層を取り付けた。まず、上クラッド層の上にクロム膜をスパッタ法により成膜し、電子ビーム描画を用いた写真製版法により図9(a)のようにマスクする。次に図9(b)のようにウェットエッチングによりコア側面に沿って上クラッド層を除去し、最後に金属クラッド層をスパッタ法により成膜する(図9(c))。光導波路作製後に溝を形成し、金属を充填する方法であるので、高温処理が必要な成膜法で上クラッド層を成膜しても、金属クラッド層が損傷を受けることはない。

【0079】導波光の曲がり部A及び分岐部Bでの損失は低減され、金属クラッド層及び屈折率分布を作製する前の損失は8.5dBであったものが、作製後には3.2dBとなった。また、曲がり光導波路の曲線部の曲率半径を小さくでき、分岐光導波路の分岐角を大きくできたことにより素子の大きさは長さ5mmとなり、通常の曲線状曲がり光導波路及び分岐光導波路を用いた場合に



比 $1/5$ に縮小できた。

【0080】実施の形態19. 本実施の形態では、石英系直線状光導波路と曲がり光導波路及び分岐光導波路との接合部に、上記実施の形態5、6に記述した金属クラッド層を有し、かつ階段式テーパー構造を有する光導波路を使用した、図29のような光パワー分配器を作製した。

【0081】石英膜の成膜は熱分解CVD法で実施し、光パワー分配器を作製した。熱分解CVD装置は図2の様に3個の原料容器8を備えており、3種類の原料蒸気を同時に基板1上に供給できる。各原料は、温度制御可能な密閉容器に充填され、原料蒸気の流量調整が正確にできる流量調節器7により、それぞれの蒸気の流量を独立に制御でき、3種類のアルコキシド原料を任意の割合で反応管9内の基板1上へ輸送することが可能である。それによりCVD膜の屈折率を制御できる。反応管9へは、亜酸化窒素ガス( $N_2O$ )を導入し、基板温度を950℃として、原料の分解・反応を熱により促進させ、設置した基板1に成膜する。基板1は、3インチ径のシリコン基板を使用した。成膜速度は、4 $\mu m$ /時間であった。熱分解CVD法は、オゾン酸化CVD法、プラズマCVD法等に比べて成膜速度が遅い。

【0082】本実施の形態ではまず、オゾン酸化型CVD法の場合と同様に、酸化シリコン中にボロンを含む下クラッド層を20ミクロン成膜し(原料はTEOS+TEB)、その後酸化シリコン中にゲルマニウムを含むコア膜を成膜する(原料はTEOS+TEG)。その後、スパッタ法や蒸着法により、コア膜上に金属クロム膜を形成し、電子ビーム描画を用いた写真製版法により所望の導波路ハターンの金属クロム膜を作製する。その後、RIE(反応性イオンエッチング)法によりコア膜をエッチングして、金属クロム膜で覆われていないコア膜を取り除き、所定の幅のコア層を形成する。その後、再びボロンを含みゲルマニウムを含まない酸化シリコン組成で、CVD膜を堆積して光導波路を作製する(原料はTEOS+TEB)。コアの形状は図29のようにした。

【0083】このように作製した光導波路の曲がり部A及び分岐部Bに、実施の形態3、4と同様に、図9の工程を経て金属クラッド層4を取り付けた。曲がり部A及び分岐部Bのコア形状は図32(a)、(b)のようにした。また、本実施の形態においては、図9の工程で、金属クラッド層4を有する分岐光導波路と石英系直線状光導波路との結合部Cに図27の拡大部に示すような金属クラッド層を有する階段式テーパー構造を形成した。図9(a)の過程の、クロム膜をマスクする際に、図29の金属クラッド層が存在する以外の領域にマスクすれば図29のような光導波路を形成できる。このような構成にすることにより、金属クラッド層を有する曲がり光導波路及び分岐光導波路と石英系直線状光導波路との結合損失を小さくできる。作製した各石英膜の屈折率は、ク

ラッド層で、1.4585、ゲルマニウムをドーパしたコア層で1.4710であり、屈折率差は約0.8%であった。

【0084】本実施の形態において作製した光パワー分配器に光を入射し、出力光が4分割されることを確認した。各部品品の金属クラッド層を作製する前は、損失が12dBであったのに対し、上記金属クラッド層作製後は3.7dBと小さくなった。また、デバイスの長さは2mmとなり、通常の曲線状光導波路とY分岐光導波路を組み合わせた光パワー分配器の $1/10$ 程度に縮小できた。

#### 【0085】

【発明の効果】以上のように、本発明の第1の構成による光導波路によれば、光導波路の曲がり部または分岐部のコア層の側面に金属クラッド層を設けるとともに、上記金属クラッド層以外の導波路材料を石英系材料で構成し、上記曲がり部または分岐部に、波動インピーダンスマッチング回路と、モードを保存させるモードフィルタとの少なくともいずれか一方を設けたので、低損失で、垂直に曲がる、あるいは低損失で垂直に分岐する光導波路を作製でき、光集積回路における各素子の小型化が可能となり、また素子間接続のための導波路配線及び各素子の配置設計の自由度が増し、光集積回路の高密度化が可能となる。

【0086】本発明の第2の構成による光導波路によれば、コア層とクラッド層、またはコア層とクラッド層と金属クラッド層により構成された光導波路において、上記光導波路の曲がり部または分岐部におけるコア層の屈折率を、曲げられる方向となる曲率中心側の屈折率が、曲率中心外側の屈折率に比べて大きくなるようにしたので、低損失で曲率半径の小さい曲線状曲がり光導波路を作製でき、光集積回路における各素子の小型化が可能となり、また素子間接続のための導波路配線及び各素子の配置設計の自由度が増し、光集積回路の高密度化が可能となる。

【0087】本発明の第3の構成による光導波路によれば、第2の構成の光導波路において、曲がり部または分岐部におけるコア層に、少なくとも1個以上の三角形の高屈折率領域を設けて屈折率に分布を持たせたので、低損失で曲率半径の小さい曲線状曲がり光導波路を作製でき、光集積回路における各素子の小型化が可能となり、また素子間接続のための導波路配線及び各素子の配置設計の自由度が増し、光集積回路の高密度化が可能となる。

【0088】本発明の第4の構成による光導波路によれば、コア層とクラッド層、またはコア層とクラッド層と金属クラッド層により構成された光導波路において、上記光導波路の曲がり部または分岐部におけるコア層に、曲げられる方向に沿ってガウス分布状の屈折率分布をもたせるとともに、上記屈折率分布のピーク位置がコア幅

の中心よりも、曲げられる方向となる曲率中心側に位置するようにしたので、低損失で曲率半径の小さい曲線状曲がり光導波路及び低損失で分岐角の大きい分岐光導波路を作製でき、光集積回路における各素子の小型化が可能となり、また素子間接続のための導波路配線及び各素子の配置設計の自由度が増し、光集積回路の高密度化が可能となる。

【0089】本発明の第5の構成による光導波路によれば、コア層とクラッド層、またはコア層とクラッド層と金属クラッド層により構成された光導波路と、上記光導波路とは幅の異なるコア層を有する光導波路とが接合された光導波路において、接合部のコア層側面に金属クラッド層を設けるとともに、上記接合部を、階段式テーパ形状をしたコア構造としたので、直線状光導波路またはファイバコネクタと、曲がり光導波路または分岐光導波路との接続損失を低減できる。

【0090】本発明の第1の製造方法によれば、光導波路の曲がり部または分岐部のコア層側面に金属クラッド層を設けた光導波路を製造する際に、コア層の側面に金属クラッド層を設けた後に、上記コア層および上記金属クラッド層を囲むクラッド層を600℃以下で成膜したので、コアの側面に取り付けた金属クラッド層が熱による損傷を受けずにクラッド層を形成できる。

【0091】本発明の第2の製造方法によれば、光導波路の曲がり部または分岐部のコア層側面に金属クラッド層を設けた光導波路を製造する際に、光導波路の曲がり部または分岐部に、コアの側面に沿った溝を形成し、上記溝に金属を充填して製造したので、熱分解CVD法や火炎堆積法など、600℃以上の成膜法を用いても金属クラッド層が熱による損傷を受けることがなく、良質な光導波路が形成でき、さらに600℃以下の成膜法に比べ、光導波路の損失を小さくできる。

【0092】本発明の第3の製造方法によれば、コア層とクラッド層、またはコア層とクラッド層と金属クラッド層により構成された光導波路において、上記光導波路の曲がり部または分岐部におけるコア層に紫外光を照射し、上記コア層の屈折率に分布を持たせたので、容易にコア層に屈折率分布を持たせることができ、低損失で曲率半径の小さい曲線状曲がり光導波路及び低損失で分岐角の大きい分岐光導波路が容易に作製できる。

【0093】本発明の第1の構成による光デバイスによれば、第1ないし第5のいずれかの構成による光導波路を使用したので、従来よりも小さい光フィルタ、光スイッチ、光分岐結合器、光合波器等の光素子や、さらにはそれらを集積した高密度な光集積回路等の光デバイスを作製できる。

#### 【図面の簡単な説明】

【図1】 本発明の実施の形態1によるL曲がり光導波路を示す図である。

【図2】 本発明の実施の形態1に係わる成膜装置を示

す構成図である。

【図3】 本発明の実施の形態1によるL曲がり光導波路の製造工程を示す図である。

【図4】 本発明の実施の形態1によるL曲がり光導波路の他の製造工程を示す図である。

【図5】 本発明の実施の形態1によるL曲がり光導波路のさらに他の製造工程を示す図である。

【図6】 本発明の実施の形態2によるT分岐光導波路を示す図である。

【図7】 本発明の実施の形態3によるL曲がり光導波路を示す図である。

【図8】 本発明の実施の形態3に係わる成膜装置を示す構成図である。

【図9】 本発明の実施の形態3によるL曲がり光導波路の製造工程を示す図である。

【図10】 本発明の実施の形態3によるL曲がり光導波路を示す図である。

【図11】 本発明の実施の形態5によるL曲がり光導波路を示す図である。

【図12】 本発明の実施の形態5による直線状光導波路とL曲がり光導波路との結合部を示す図である。

【図13】 本発明の実施の形態6によるT分岐光導波路を示す図である。

【図14】 本発明の実施の形態7による曲がり光導波路を示す図である。

【図15】 本発明の実施の形態8による曲がり光導波路を示す図である。

【図16】 本発明の実施の形態9によるY分岐光導波路を示す図である。

【図17】 本発明の実施の形態10による曲がり光導波路を示す図である。

【図18】 本発明の実施の形態11による曲がり光導波路を示す図である。

【図19】 本発明の実施の形態12によるY分岐光導波路を示す図である。

【図20】 本発明の実施の形態13によるマッハツェンダ型光フィルタ及びその波長特性を示す図である。

【図21】 本発明の実施の形態14による光集積回路を示す図である。

【図22】 本発明の実施の形態14による光集積回路の製造工程を示す図である。

【図23】 本発明の実施の形態14による光集積回路の製造工程を示す図である。

【図24】 本発明の実施の形態14による光集積回路の製造工程を示す図である。

【図25】 本発明の実施の形態15によるマッハツェンダ型光フィルタ及びその波長特性を示す図である。

【図26】 本発明の実施の形態16によるマッハツェンダ型光スイッチ及びそのスイッチング特性を示す図である。

【図27】 本発明の実施の形態17によるマッハツエング型光スイッチ及びそのスイッチング特性を示す図である。

【図28】 本発明の実施の形態18による光パワー分配器を示す図である。

【図29】 本発明の実施の形態19による光パワー分配器を示す図である。

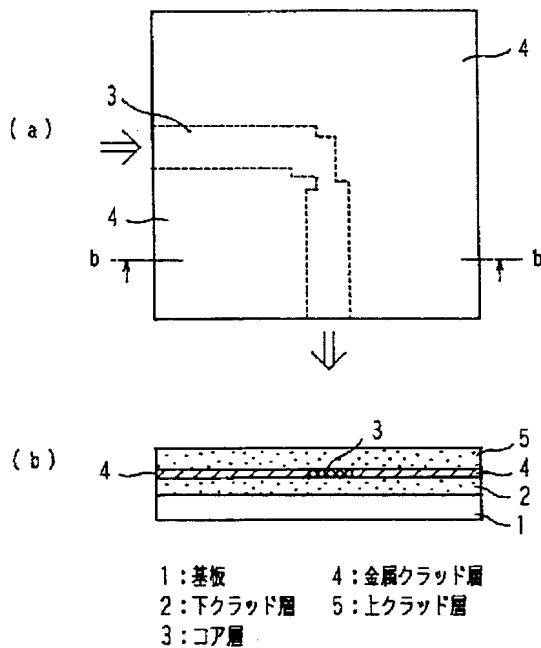
【図30】 従来の曲線状光導波路及びY分岐光導波路を示す図である。

【図31】 従来の光路を垂直に折り曲げるための金属ミラーを示す図である。

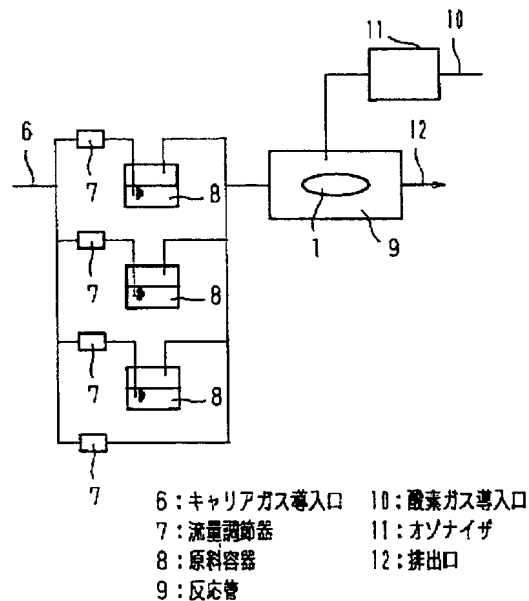
【図32】 金属クラッド層を有するL曲がり光導波路及びT分岐光導波路の設計値を示す図である。

【符号の説明】

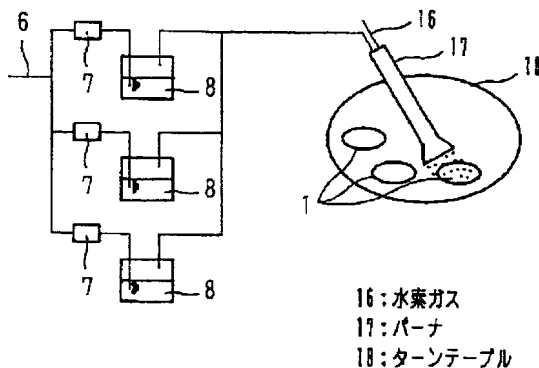
【図1】



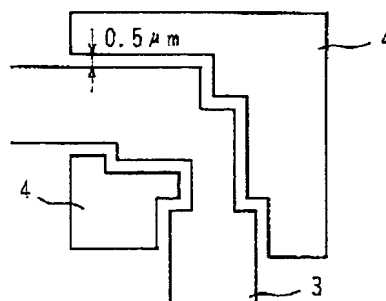
【図2】



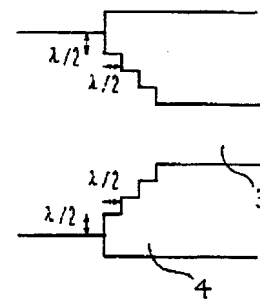
【図8】



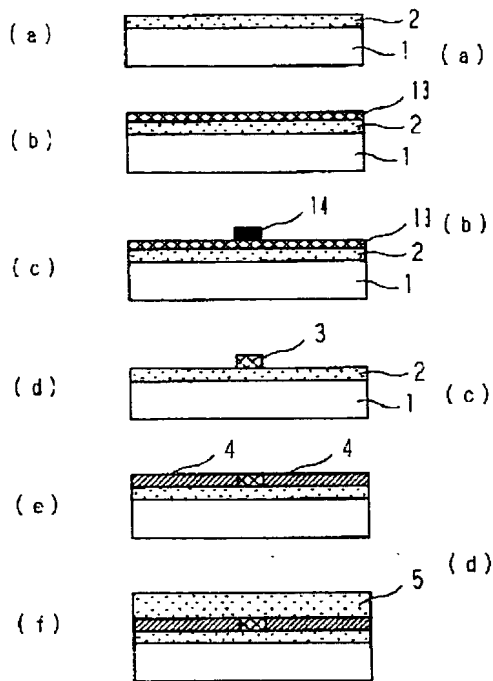
【図10】



【図12】

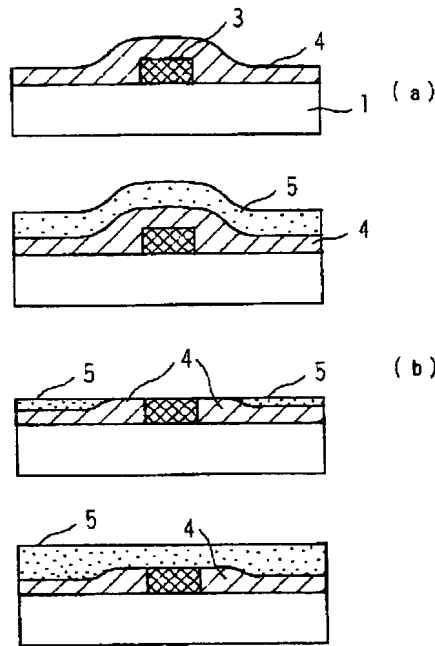


【図3】

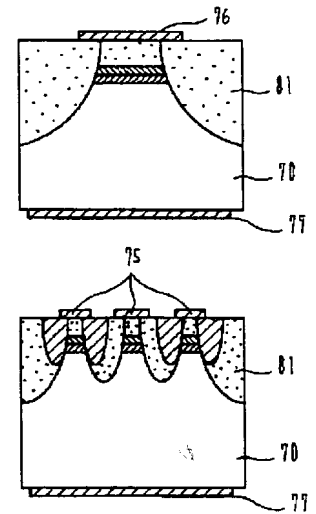


13: コア膜  
14: クロムマスク

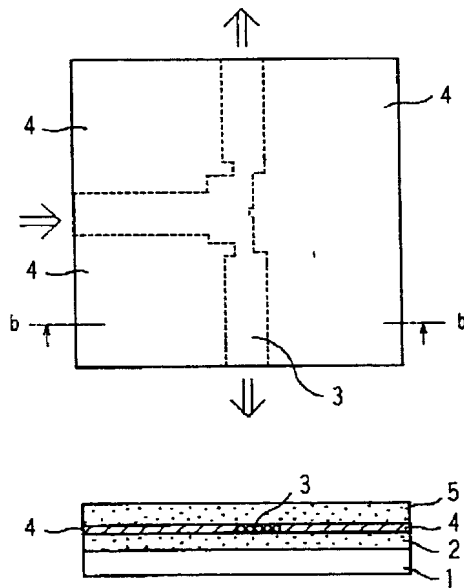
【図4】



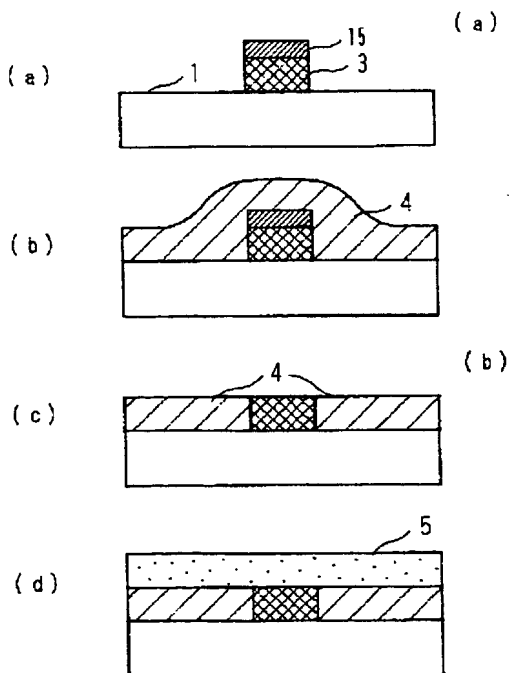
【図24】



【図6】

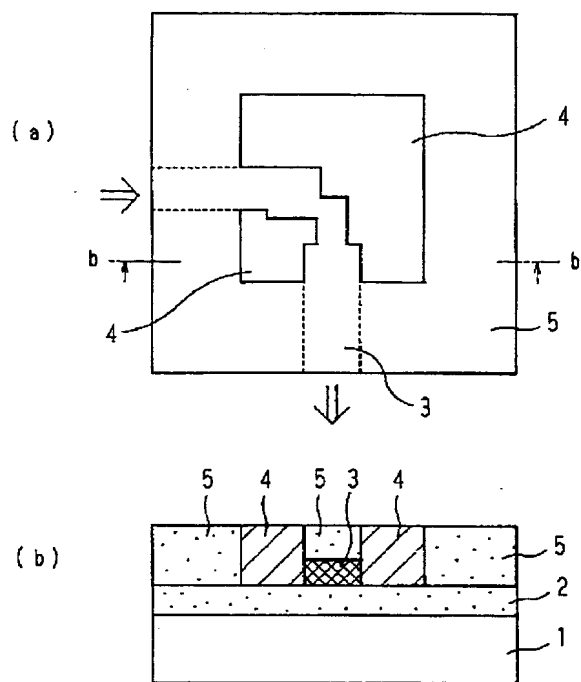


【図5】

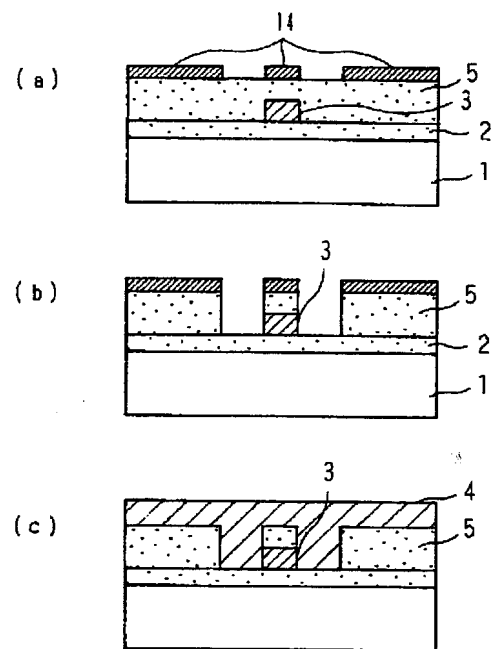


15: フォトリソグ

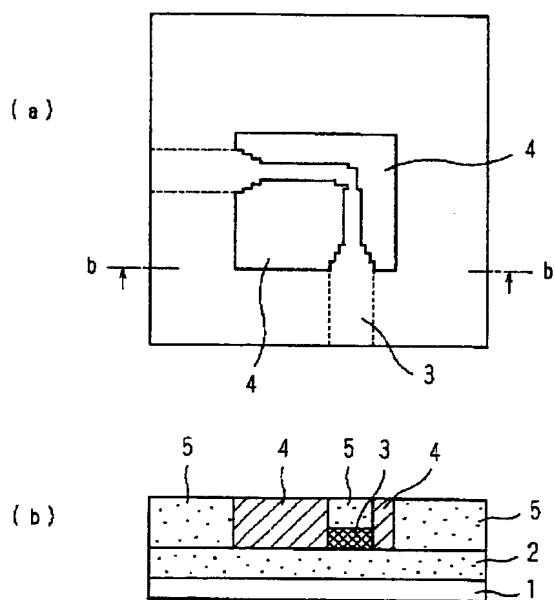
【図7】



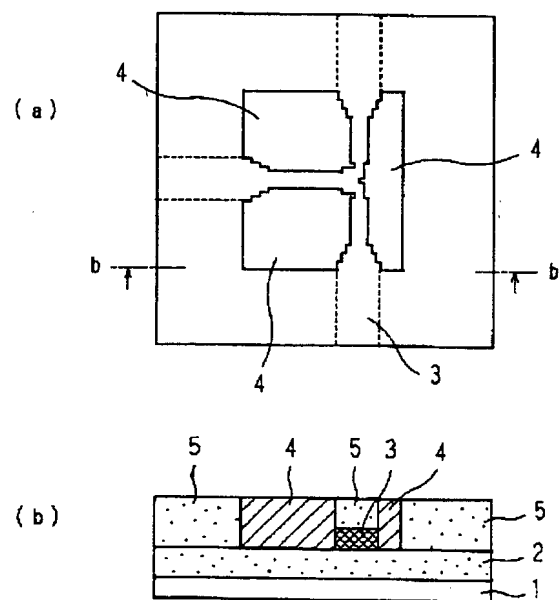
【図9】



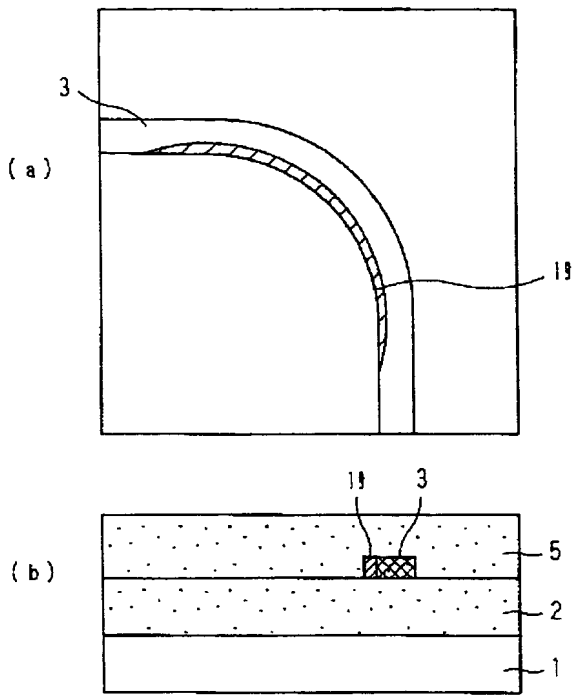
【図11】



【図13】

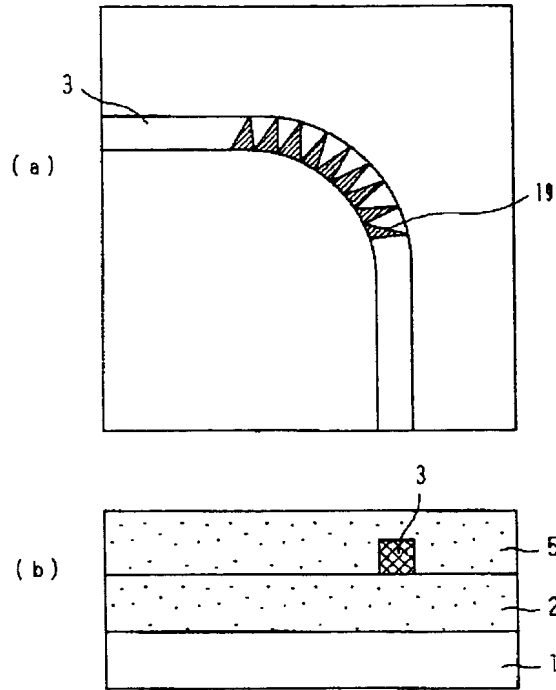


【図14】

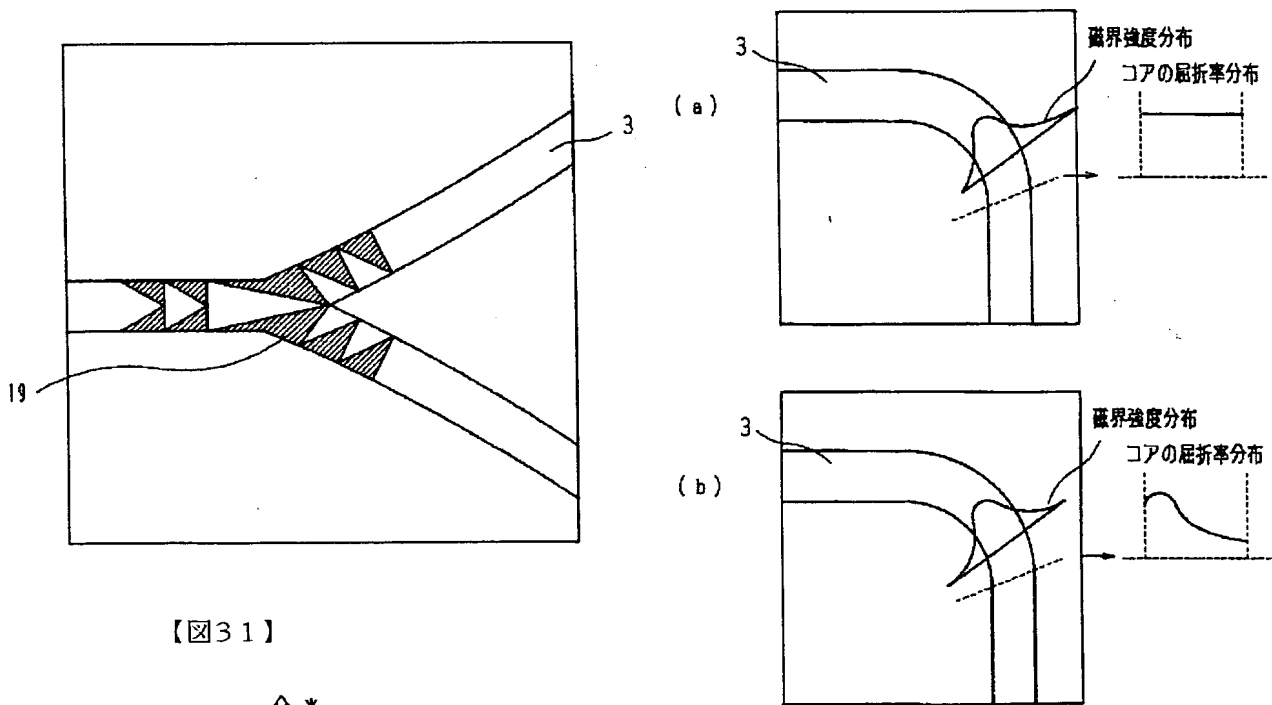


19: 高屈折率領域

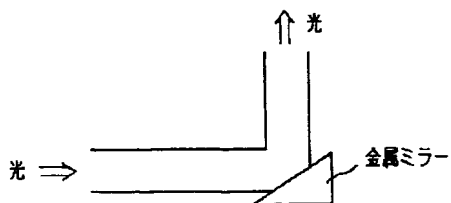
【図15】



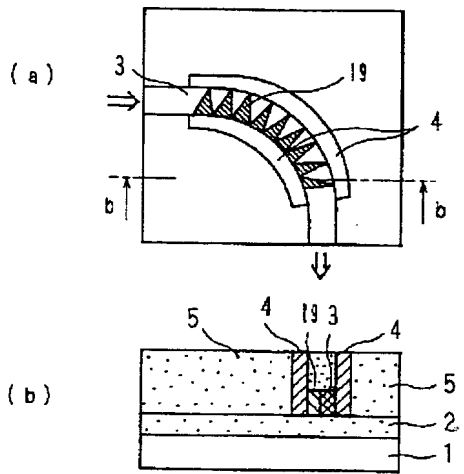
【図17】



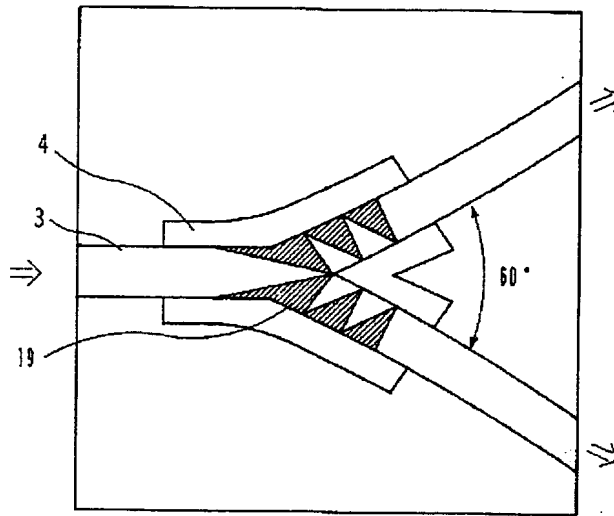
【図31】



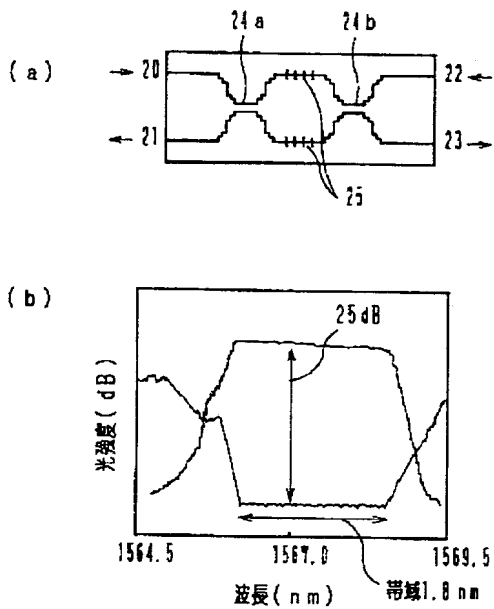
【図18】



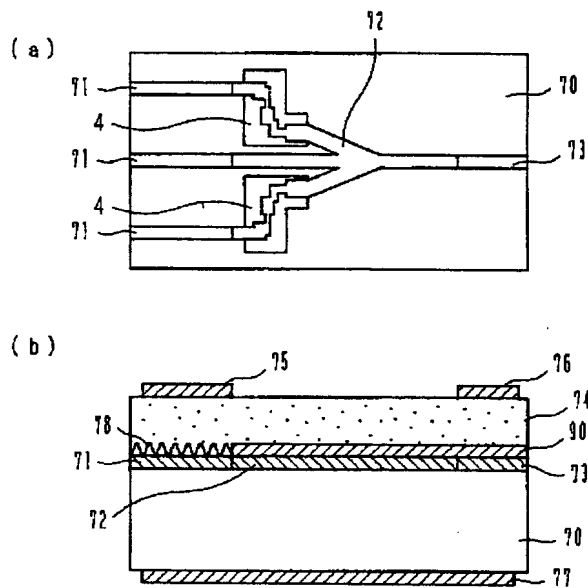
【図19】



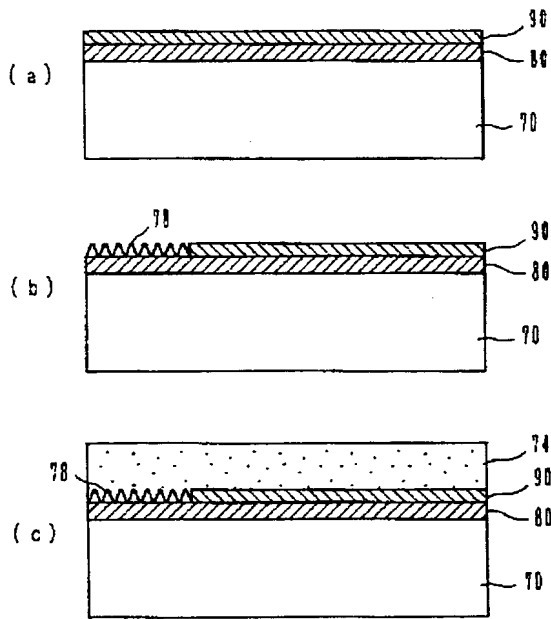
【図20】



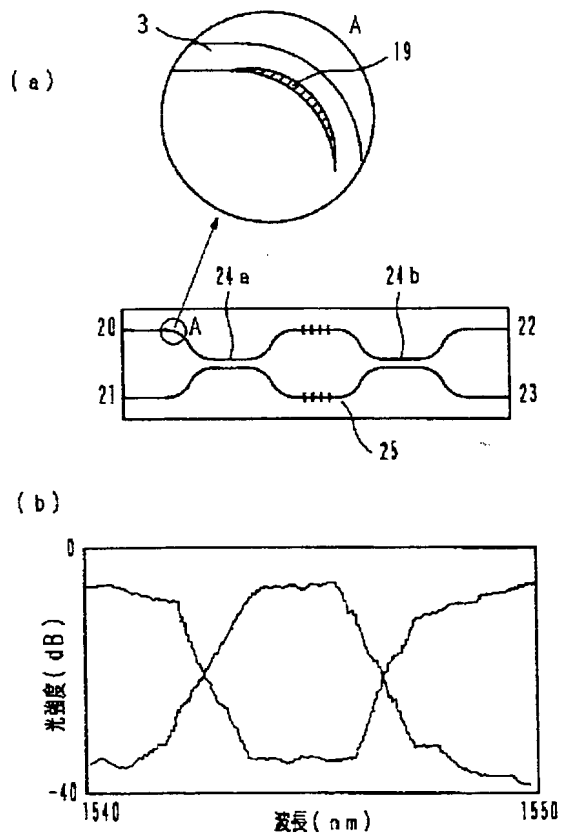
【図21】



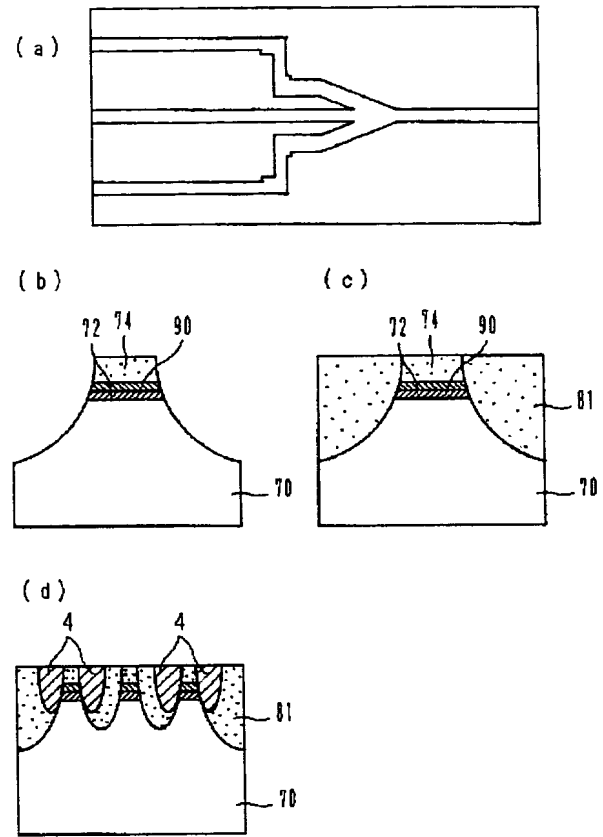
【図22】



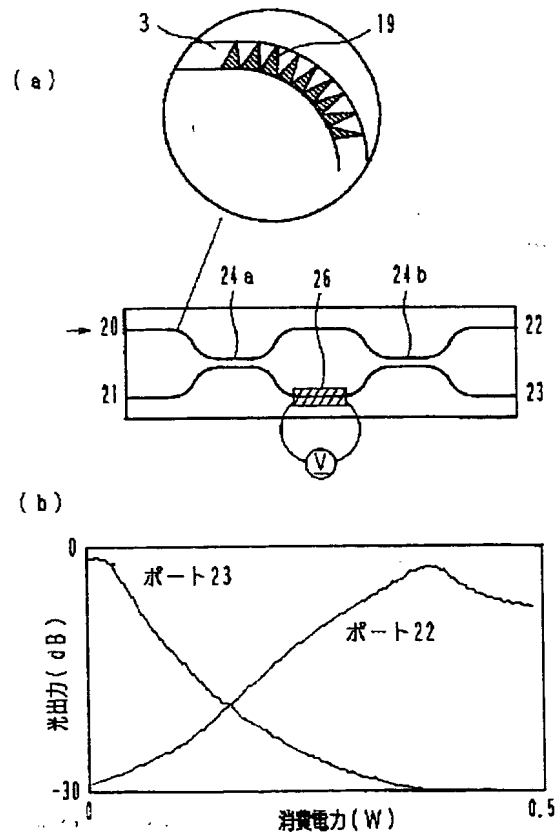
【図25】



【図23】

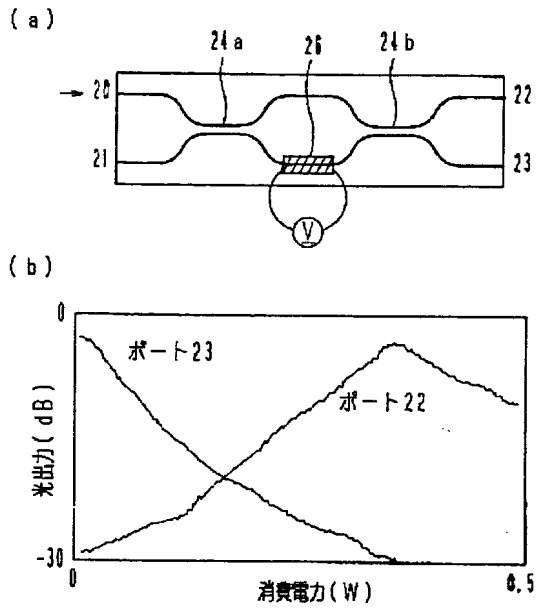


【図26】

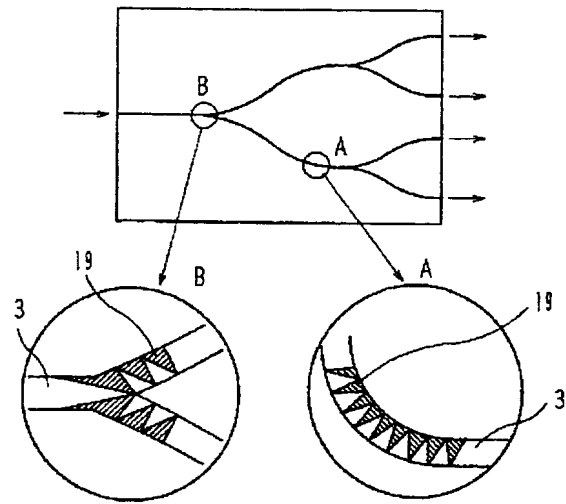




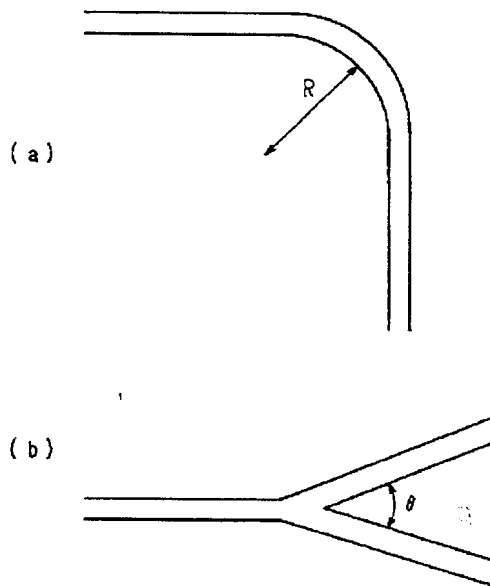
【図27】



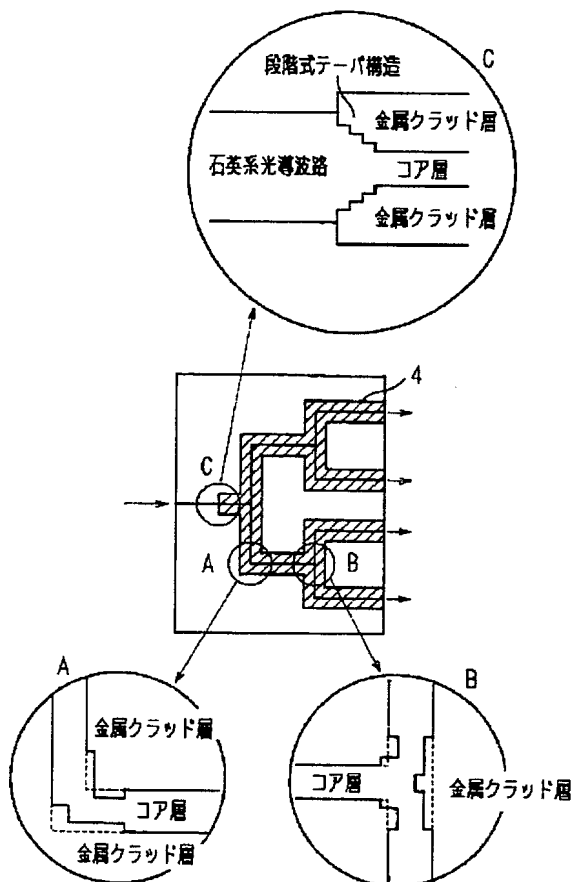
【図28】



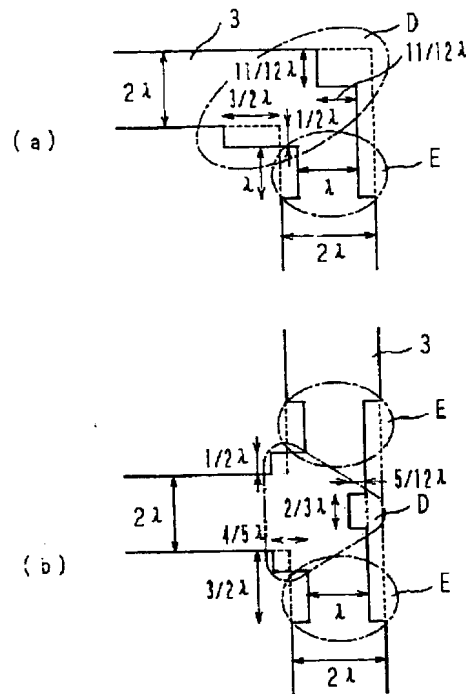
【図30】



【図29】



【図32】



フロントページの続き

(72)発明者 吉新 喜市  
東京都千代田区丸の内二丁目2番3号 三  
菱電機株式会社内

(72)発明者 今田 勝大  
東京都千代田区丸の内二丁目2番3号 三  
菱電機株式会社内

(72)発明者 竹谷 元  
東京都千代田区丸の内二丁目2番3号 三  
菱電機株式会社内

(72)発明者 内川 英興  
東京都千代田区丸の内二丁目2番3号 三  
菱電機株式会社内

(72)発明者 井筒 雅之  
東京都小金井市貫井北町4丁目2番1号  
郵政省通信総合研究所内

Fターム(参考) 2H047 KA04 KA12 KA13 LA03 LA12  
LA19 PA04 PA05 PA06 PA11  
PA22 PA24 QA01 QA02 QA04  
QA07 TA05 TA32 TA36 TA43